



HAL
open science

Détermination de valeurs seuils sécheresse pour les eaux de surface du département de Mayotte - Rapport final

Pierre Nicolle, Laure Lebecherel, Charles Perrin, Olivier Delaigue

► To cite this version:

Pierre Nicolle, Laure Lebecherel, Charles Perrin, Olivier Delaigue. Détermination de valeurs seuils sécheresse pour les eaux de surface du département de Mayotte - Rapport final. irstea. 2016, pp.95. hal-02606202

HAL Id: hal-02606202

<https://hal.inrae.fr/hal-02606202>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Détermination de valeurs seuils sécheresse pour les eaux de surface du département de Mayotte

RAPPORT FINAL

NOVEMBRE 2016

**PIERRE NICOLLE, LAURE LEBECHEREL,
CHARLES PERRIN, OLIVIER DELAIGUE**

Centre d'Antony
1 rue Pierre-Gilles de Gennes
92761 Antony



Résumé

Les cours d'eau de Mayotte sont soumis à des pressions croissantes pour l'approvisionnement en eau potable de la population et la satisfaction de différents usages, notamment agricoles. Pour satisfaire ces besoins en eau, les gestionnaires disposent de différentes sources d'approvisionnement, incluant les eaux superficielles (captages en rivières et retenues collinaires), souterraines et le dessalement de l'eau de mer. La tension sur la ressource et les besoins de protection des milieux ont conduit la DEAL à proposer de mettre en place des outils d'aide à la gestion de l'eau, par l'établissement des seuils sécheresse sur les eaux superficielles. L'objectif est de limiter graduellement les usages en périodes de manque d'eau, pour ainsi mieux gérer ces périodes déficitaires.

La présente étude a ainsi eu pour objectif d'établir des seuils de gestion sur 25 cours d'eau de Mayotte. Le travail a compris plusieurs étapes : la constitution d'une base de données aussi complète que possible et critiquée, portant sur les conditions climatiques et hydrologiques ; la mise en place de modélisations hydrologiques pour étendre les chroniques de données de débit ; l'analyse statistique des séries de données disponibles pour le calcul de débits réservés (dixième du module) et de seuils de gestion. Sur chaque station, quatre seuils de gestion ont été calculés, correspondant à des sévérités d'étiage croissantes (de périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans). L'analyse de ces seuils et les considérations pratiques de mise en œuvre ont conduit au final à retenir un ou deux seuils par station. L'utilisation de ces seuils pour gérer les périodes d'étiage devrait contribuer à limiter les périodes de tension. Une analyse succincte de la mise en place des débits réservés associés montre cependant que certaines conditions très déficitaires pourraient poser problème pour le maintien du fonctionnement de certaines unités de traitement de l'eau.

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Contexte	4
1.2	Objectifs de l'étude	6
2	Base de données	6
2.1	Traitement du Modèle Numérique de Terrain et traçage du contour des bassins versants	6
2.2	Les données hydrométriques	8
2.2.1	Origine des données	8
2.2.2	Critique des données de débit	9
2.3	Les données pluviométriques	13
2.3.1	Origine des données	13
2.3.2	Interpolation de la pluie de bassin	15
2.4	Les données d'évapotranspiration potentielle	20
2.5	Les données de volume des retenues de Combani et Dzoumogné	24
2.6	Fichiers textes récapitulatifs des métadonnées et des données hydroclimatiques par bassin versant	24
2.7	Fiches graphiques récapitulatives des données par bassin versant	25
3	Modélisation hydrologique	26
3.1	Méthodologie pour la reconstruction des chroniques de débit	26
3.1.1	Modélisation hydrologique	26
3.1.2	Calage des paramètres du modèle hydrologique	29
3.1.3	Initialisation des états internes du modèle	30
3.2	Performances du modèle lors du calage des paramètres (1995-2016)	31
3.3	Performances du modèle lors de la simulation d'une longue chronique (1991-2016)	33
3.3.1	Etude des chroniques de débits simulés	33
3.3.2	Cas particulier des bassins influencés par une retenue	38
3.3.3	Comparaison quantitative entre les débits simulés et observés	41
3.4	Sensibilité du modèle aux données d'ETP	44
3.5	Conclusion sur la modélisation hydrologique	46
4	Détermination des seuils sécheresse	46
4.1	Cadre réglementaire	46
4.2	Méthodologie pour la détermination des seuils hydrométriques	48
4.3	Débits minimum biologiques	49
4.4	Détermination des seuils hydrométriques	50
4.4.1	Calcul des VCN3 (débit moyen minimal annuel sur 3 jours consécutifs)	50
4.4.2	Qualité des ajustements de la loi log-normale à la distribution des VCN3	54
4.4.3	Sensibilité des seuils à l'ETP	55
4.5	Analyse des seuils hydrométriques	57
4.5.1	Occurrence des situations à risque	57

4.5.2	Comparaison des seuils aux débits biologiques	62
4.6	Tableau récapitulatif des seuils sécheresse par station.....	64
5	Implication de la mise en place des seuils pour la gestion de la ressource en eau	68
5.1	Eléments de contexte	68
5.2	Modalités de gestion actuelle	71
5.3	Implications de la mise en place des seuils	71
5.4	Analyse des conséquences de la mise en place des seuils.....	75
6	Conclusion et perspectives	78
7	Bibliographie.....	79
Annexe 1	Critique des données de débit.....	81
Annexe 2	Recensement des prélèvements agricoles	84
Annexe 3	Graphiques stations par stations.....	87

1 Introduction

1.1 Contexte

Mayotte est un ensemble d'îles, situé dans l'archipel des Comores, constitué de deux îles principales, Grande-Terre et Petite-Terre, et de plusieurs autres petites îles. La superficie totale est d'environ 376 km². Le climat est tropical avec deux saisons contrastées :

- une saison chaude et humide, saison des pluies, de novembre à avril/mai,
- une saison sèche de mai à octobre, avec des températures plus fraîches.

Mayotte est soumise à des dépressions tropicales et des cyclones, qui surviennent généralement entre janvier et avril, et parfois entre novembre et décembre.

La Figure 1 présente la carte du relief et du réseau hydrographique de Mayotte.

Le réseau hydrographique est composé de nombreuses ravines et de quelques rivières pérennes essentiellement localisées dans la partie nord de l'île. Les bassins versants sont de petite taille avec des linéaires assez courts. Les cours d'eau sont très réactifs aux épisodes pluvieux qui peuvent être intenses, ce qui peut générer des crues rapides et importantes en termes de volume. Les étiages sont peu soutenus par les eaux souterraines, et sont marqués en période sèche (assecs fréquents, notamment dans la partie sud de l'île, moins arrosée). Ces éléments conditionnent en partie les difficultés de gestion de la ressource en eau, puisque l'essentiel de l'alimentation en eau potable (80%) est assuré par les eaux superficielles (captages en rivière et présence de retenues collinaires, Dzoumogné et Combani, d'une capacité de 2 hm³ et 1,5 hm³ respectivement).

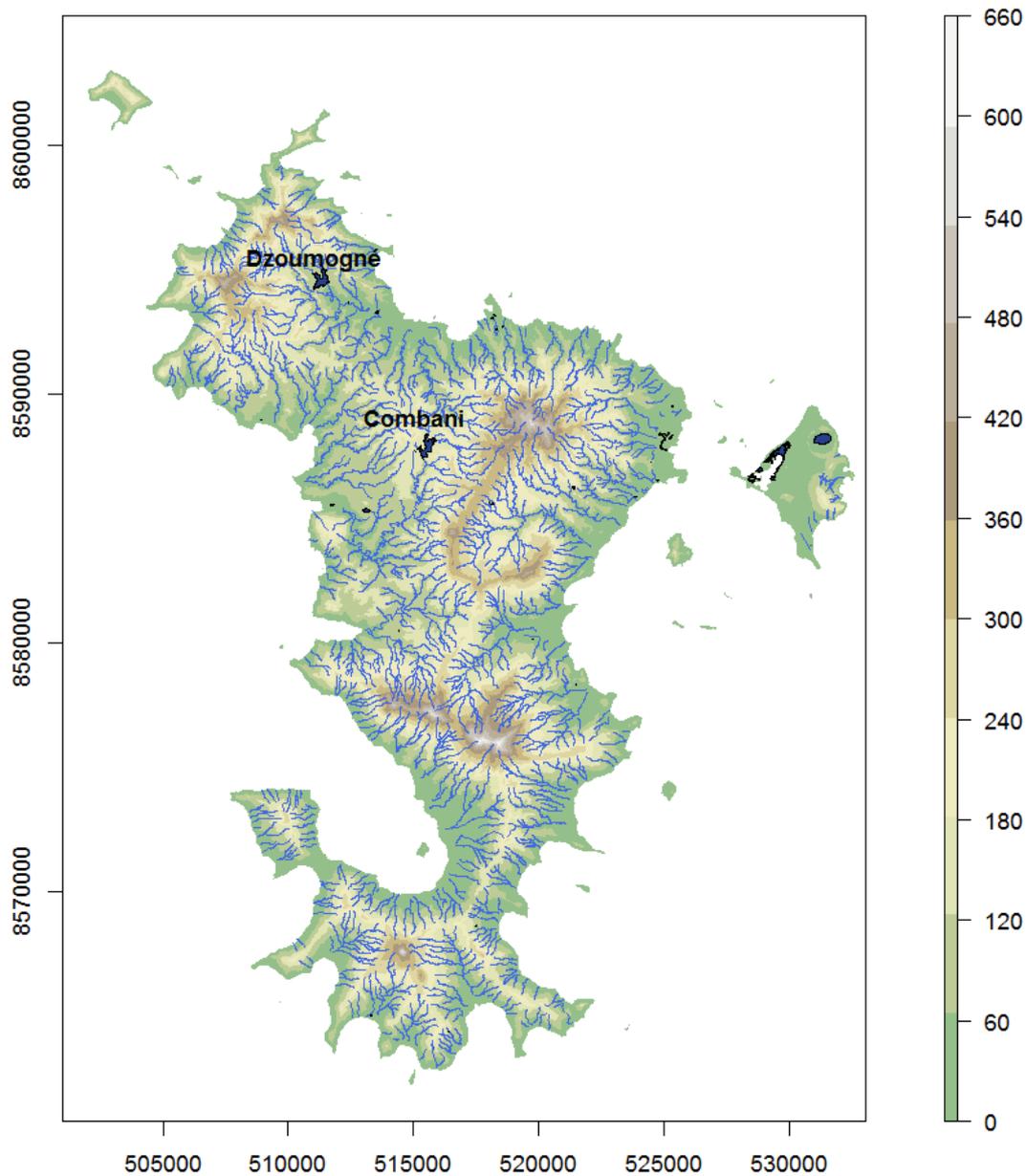


Figure 1 : Carte du relief et du réseau hydrographique de Mayotte et localisation des retenues collinaires

Il n'y a actuellement pas de gestion homogène des périodes d'étiage à l'échelle du département, et la DEAL souhaite mettre en place des valeurs seuils sur les eaux de surface, de manière à mieux préserver la ressource en eau. Des améliorations dans la gestion de l'eau semblent d'autant plus nécessaires que la demande en eau va croissante, en lien avec une augmentation rapide de la population de l'île. Une démarche similaire d'estimation des seuils sécheresse a été finalisée récemment sur les eaux souterraines [Petit et al., 2014].

Des travaux de caractérisation des débits d'étiage sur Mayotte ont déjà été réalisés, avec notamment des estimations des QMNA5 (Asconit et Sogreah, 2008) et des débits minimum biologiques (Asconit, 2009). Une difficulté associée à l'étude des étiages à l'échelle du territoire est la relativement faible abondance des mesures de débits, et une incertitude assez forte sur les mesures hydrométriques en basses eaux. Des travaux de caractérisation des bilans hydrologiques des bassins versants ont été réalisés, notamment sur les rivières Coconi et Kwalé dans le centre de Grande-Terre [Stucky, 2004a; b] avec des tentatives d'application de modèles hydrologiques simples. Les résultats montrent les

difficultés de l'exercice, notamment liées aux incertitudes de mesure et aux difficultés d'estimation des pluies (voir également *Stollsteiner et Cluzet* [2008]).

Les travaux réalisés au cours de ces dernières années par Irstea sur la modélisation hydrologique en contexte de bassins versants peu ou mal jaugés montrent cependant qu'il y a une réelle plus-value à utiliser ces outils de modélisation, par exemple pour l'extension de séries, de manière à permettre des estimations plus robustes des débits sur de longues périodes (voir par ex. *Lebecherel* [2015]). Par ailleurs, des travaux récents sur la Réunion ont montré tout l'intérêt d'avoir des procédures homogènes de détermination des seuils sécheresse à l'échelle d'un territoire [*Nicolle et al.*, 2014].

1.2 Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, cette étude propose d'utiliser la modélisation hydrologique pour compléter les séries de débit existantes sur Mayotte, et de réaliser sur ces séries étendues une analyse statistique permettant de calculer de manière homogène à l'échelle de Mayotte des seuils sécheresse avec trois ou quatre niveaux cibles (typiquement vigilance, alerte, alerte renforcée, crise). On exploitera pour cela les méthodes développées à Irstea. Cette étude sera réalisée dans la continuité des travaux menés en 2014 sur l'Île de la Réunion et portera uniquement sur les débits de surface, une étude récente ayant porté sur les eaux souterraines.

2 Base de données

La première étape de cette étude a consisté à mettre en place une base de données aussi exhaustive que possible sur les pluies, débits et ETP mesurés sur Mayotte au pas de temps journalier, données qui seront nécessaires pour l'application des méthodes hydrologiques.

2.1 Traitement du Modèle Numérique de Terrain et traçage du contour des bassins versants

L'objectif de cette étape est d'obtenir des contours de bassins aussi fiables que possible, permettant de déterminer les superficies de bassins versants et ensuite d'extraire les pluies de bassin correspondantes.

Deux modèles numériques de terrain ont été utilisés :

- BDAlti réalisé par l'IGN
- Litto3D réalisé conjointement par l'IGN et le SHOM

Il s'agit de MNT avec un pas d'espace horizontal de 5 m, et une précision altitudinale de 20 à 50 cm (relevés Lidar). Tous les traitements du MNT ont été réalisés à l'aide du logiciel GRASS (<https://grass.osgeo.org/>) appelé depuis l'environnement R (<https://cran.r-project.org/>).

A partir du MNT, nous avons dans un premier temps détecté et comblé les cuvettes du MNT, c'est-à-dire les points entourés seulement de points plus hauts (Figure 2a). Les pentes calculées grâce au MNT permettent de déterminer les directions d'écoulement, forcées par le réseau hydrographique observé (réseau Carthage, version 2013) (Figure 2b). Une fois la direction des flux calculée, le réseau hydrographique a ainsi pu être obtenu. Nous avons par la suite repositionné les stations

hydrométriques sur le réseau hydrographique avant de pouvoir tracer le contour de chaque bassin versant (voir l'exemple de Mro oua Coconi à Apandzo sur la Figure 3). De nouvelles coordonnées des stations hydrométriques ont été calculées pour correspondre au réseau hydrographique virtuel (déterminé par le MNT). Les différences entre les contours de bassin versant issus des deux MNT sont minimales, et dues à la présence de micro-topographie (e.g. routes) ou de zones plates aux niveaux des stations hydrométriques. La comparaison avec les cartes IGN ou les images satellites ont permis de trancher dans les cas litigieux.

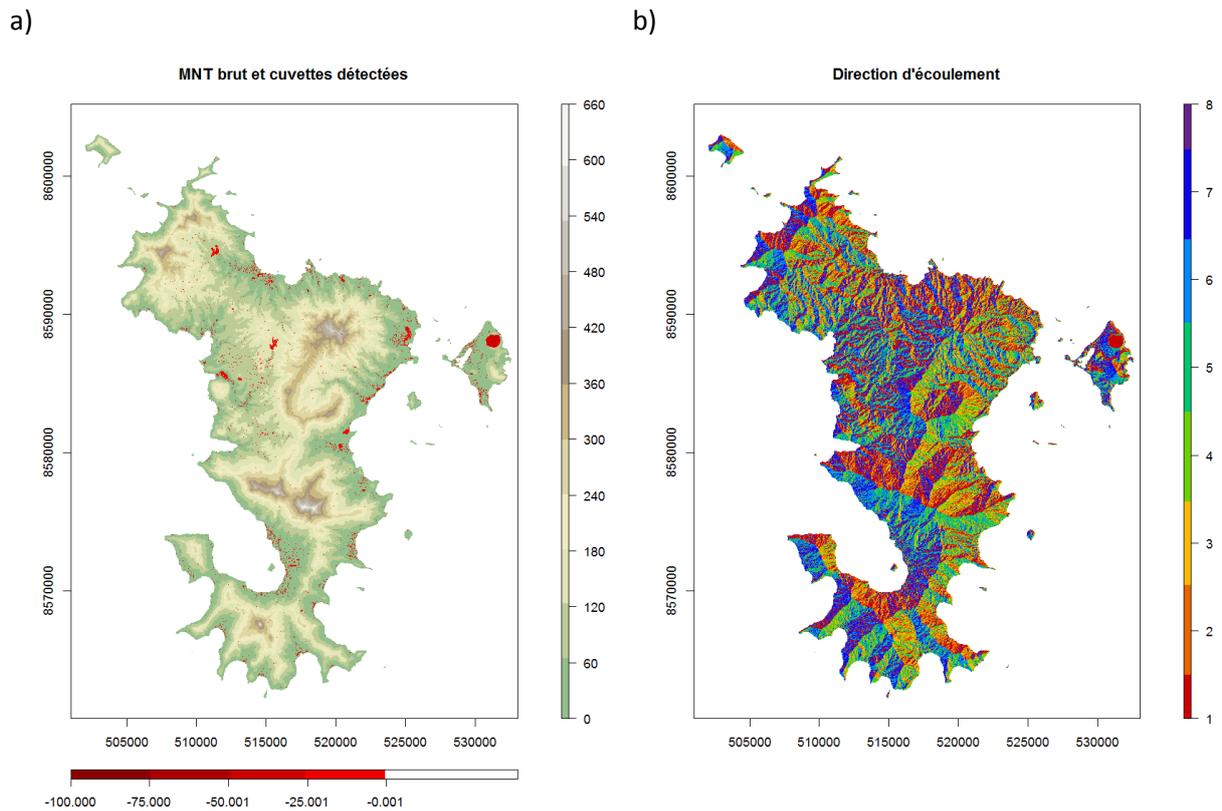


Figure 2. a) Modèle Numérique de Terrain de Mayotte et détection des cuvettes en rouge ; b) Cartographie de la direction d'écoulement de Mayotte

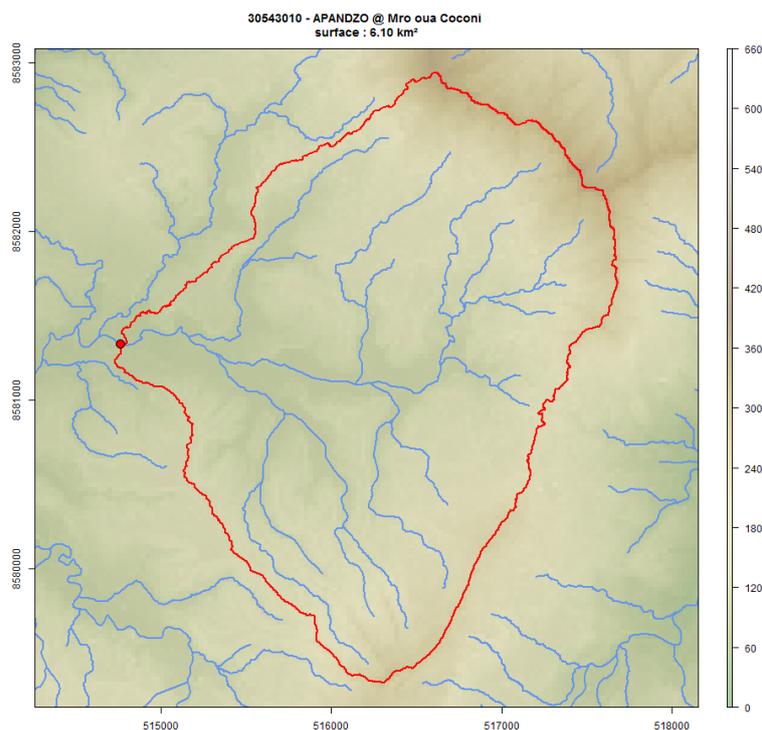


Figure 3. Contour du bassin versant de Mro oua Coconi à Apandzo extrait à partir du MNT

2.2 Les données hydrométriques

2.2.1 Origine des données

Les données hydrométriques ont été mises à disposition par la DEAL. Cette base de données comporte des mesures de débit instantanés (et non des valeurs moyennes journalières) de 28 stations hydrométriques. La DEAL nous a fourni deux sources d'information hydrométrique :

- données de débit issues d'une base de données au format EXCEL ;
- données de débit issues de la base de données du logiciel Barème (nommée ACCESS par la suite).

Le Tableau 1 présente un récapitulatif des données disponibles pour chaque bassin versant. La base de données ACCESS donne également accès aux mesures de hauteur d'eau associées aux mesures de débit obtenues lors des jaugeages.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des données hydrométriques disponibles dans chacune des bases de données ACCESS et EXCEL pour chaque bassin versant

Nom de la station	Code hydro	Surface (km ²)	Période données ACCESS	Nombre de mesures ACCESS	Période données EXCEL	Nombre de mesures EXCEL
APANDZO	30543010	6,1	2009-2016	106	1999-2002	275
BANDRAZIA	30461610	3,56	NA	0	1995-2002	287
BATRINI	30472010	3,45	2009-2016	193	1995-2002	302
BOUNGOUMOUHÉ	30458410	2,06	2009-2016	194	1995-2002	287
BOUYOUNI BAS	30356410	8,61	2009-2016	277	1995-2015	1236
BOUYOUNI HAUT	30351410	5,36	2009-2016	216	1995-2002	317

Nom de la station	Code hydro	Surface (km ²)	Période données ACCESS	Nombre de mesures ACCESS	Période données EXCEL	Nombre de mesures EXCEL
DEMBENI BAS	30921020	11,89	2009-2016	197	1998-2015	633
DEMBENI HAUT	30921010	5,08	2009-2016	130	1997-2002	234
DZOUMOGNÉ OUEST	30333320	15,25	2016-2016	2	1995-2000	186
DZOUMOGNÉ RETENUE	30330220	7,45	2009-2016	107	2002-2004	146
GOULOUÉ	30131410	2,32	NA	0	1995-2002	308
KWALÉ HAUT	30143010	4,03	NA	0	1995-2002	311
KWALÉ STATION	30147210	12,07	2009-2016	194	2005-2007	111
LONGONI	30361810	2,56	2009-2016	252	1995-2015	781
MAPOUÉRA	30333310	2,98	2009-2016	198	NA	0
MERESSE	30356810	2,5	2009-2016	266	1995-2015	824
M'GOMBANI	30211210	2,03	2009-2016	216	1998-2002	194
MOHOGONI	30334510	2,65	2009-2016	254	1999-2012	536
M'ROALÉ	30522010	4,57	2009-2016	192	1995-2002	356
M'RONABEJA	30733310	1,72	2009-2016	70	2004-2007	159
M'TSANGAMOUI	30448810	1,89	NA	0	1995-2002	296
MWALA	30530210	3,26	2009-2016	274	1998-2015	733
OUROVENI PONT	30533110	13,88	2009-2016	190	NA	0
OUROVENI STATION	30530220	18,72	NA	0	1995-2002	458
PASSAMAINTY	30139110	6,49	2010-2016	126	NA	0
SOULOU	30512210	2,92	2009-2016	196	1995-2002	290
BE DAPANI	30742610	NA	2016-2016	2	NA	0
SALIM BE	30943210	NA	2016-2016	2	NA	0

2.2.2 Critique des données de débit

A partir de ces bases de données, nous avons réalisé une critique des données de débit afin de déterminer leur fiabilité. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les relations hauteur d'eau-débit disponibles, les fiches bassin fournies par la DEAL et les informations recueillies à Mayotte lors d'une visite de terrain en février 2016 avec les hydromètres de la DEAL. Une synthèse de toutes ces informations a été mise sous forme graphique pour chaque bassin (voir l'exemple de Mro oua mouhogoni à Mohogoni sur la Figure 4, l'intégralité de ces fiches est fournie en annexe). Lors de notre visite à Mayotte, les services opérationnels de la DEAL nous ont fait part d'un changement de pratique concernant les méthodes de jaugeage à partir de décembre 2012, suite à la formation des hydromètres par la DREAL Centre. L'observation des chroniques de débit a également aidé à la critique des données et lorsqu'un changement visuel au niveau de la chronique était visible à partir de cette date, les débits mesurés avant décembre 2012 ont été par la suite considérés comme douteux.

Les bassins versants Be Dapani et Salim Be ont été écartés de l'étude en raison de leur très faible disponibilité de débit (seulement deux mesures), ainsi que le bassin versant de M'Tsangamouji en raison de la suspicion de données mesurées douteuses sur ce bassin (voir la présence anormale de « paliers » au niveau des débits observés sur la Figure 5).

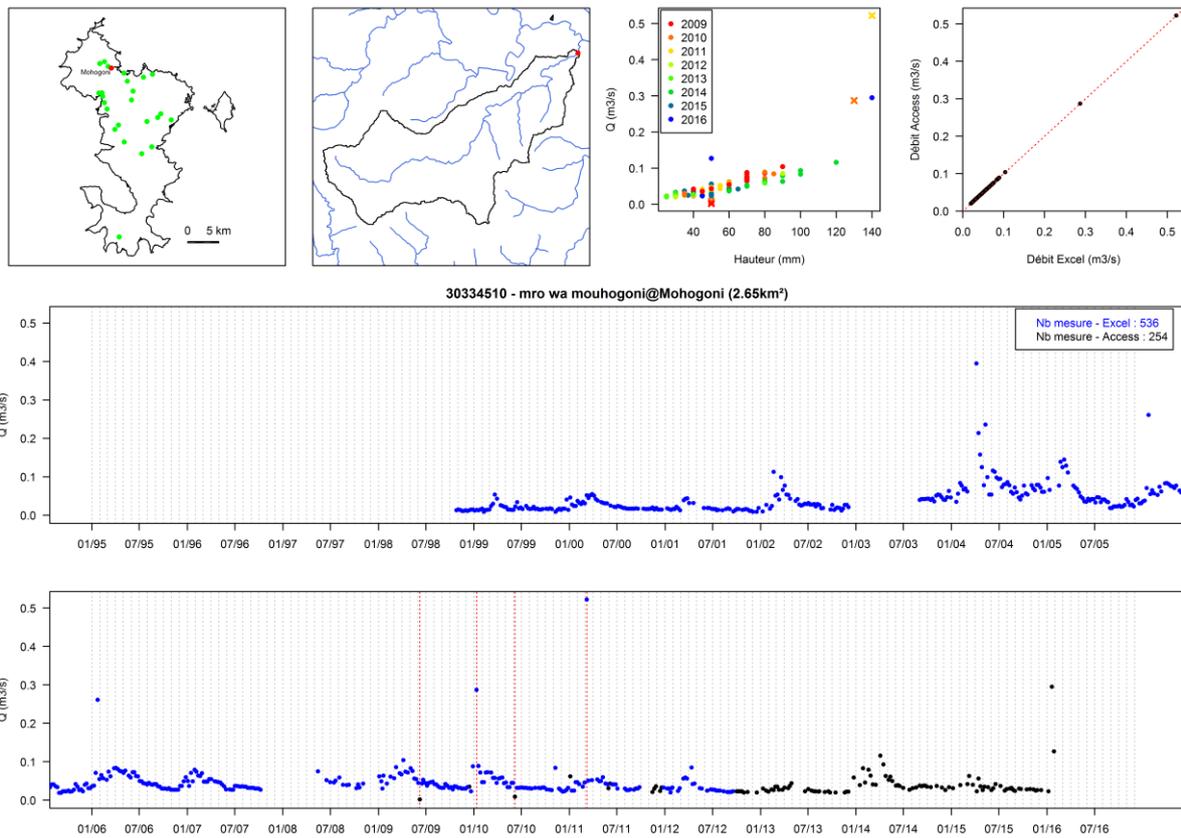


Figure 4. Fiche du bassin versant de Mohogoni utilisée pour la critique des données de débit. 1ère ligne et de gauche à droite : positionnement de la station sur la carte de Mayotte ; contour du bassin versant et réseau hydrographique ; relation hauteur-débit ; comparaison des données issues de la base de données Excel et Access au date commune. 2ème et 3ème lignes : chroniques des débits (en bleu débits issus de la base de données Excel et en noir débits issus de la base de données Access ; en pointillé rouge les mesures jugées douteuses par la DEAL).

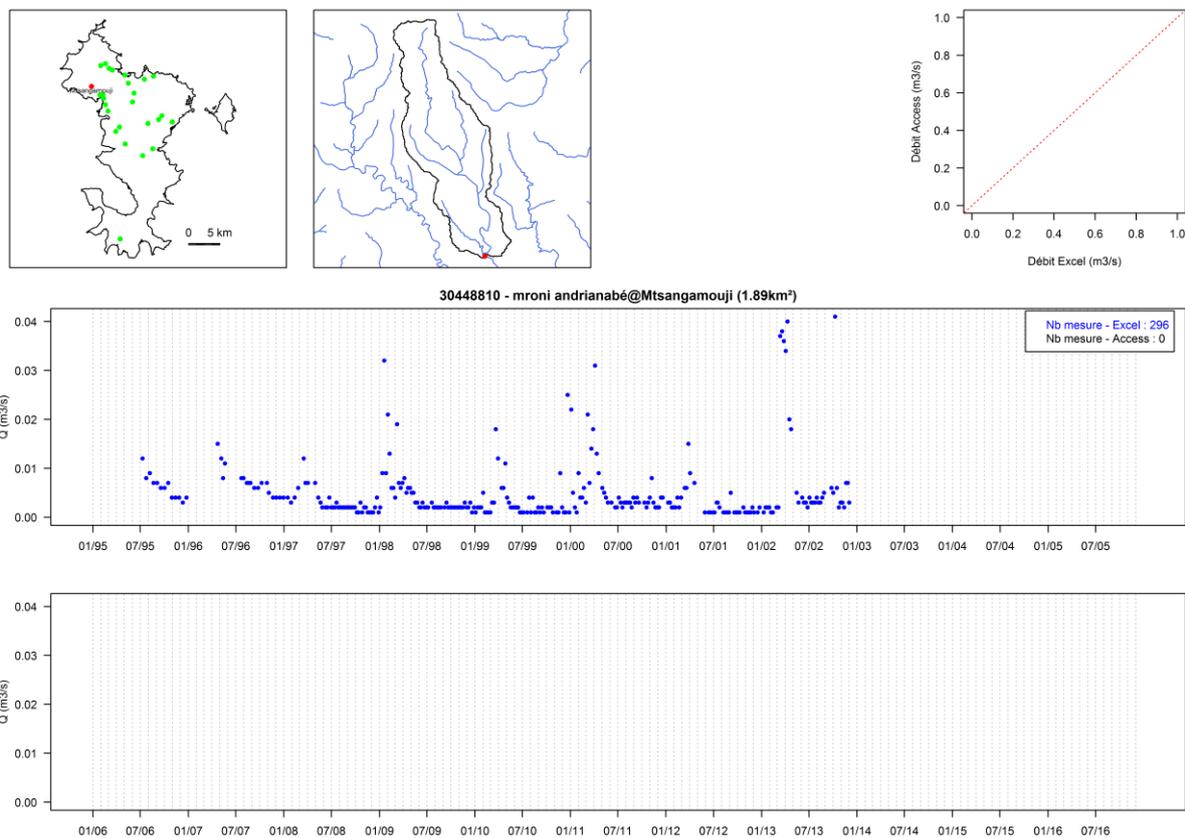


Figure 5. Fiche du bassin versant de M'Tsangamouji utilisée pour la critique des données de débit. 1ère ligne et de gauche à droite : positionnement de la station sur la carte de Mayotte ; contour du bassin versant et réseau hydrographique ; relation hauteur-débit ; comparaison des données issues de la base de données Excel et Access aux dates communes. 2ème et 3ème lignes : chroniques des débits (en bleu débits issus de la base de données Excel et en noir débits issus de la base de données Access ; en pointillé rouge les mesures jugées douteuses par la DEAL).

Le Tableau 2 donne la liste des 25 bassins versants finalement retenus pour cette étude ainsi que la disponibilité des données à chaque station hydrométrique. La Figure 6 indique leur localisation. Toutes les stations de mesure sont situées dans la moitié septentrionale de l'île à l'exception de la M'Ronabéja. Compte tenu des contrastes climatiques sur l'île (voir partie 2.3.2), cette faible disponibilité de données hydrométriques dans la partie méridionale de l'île est limitante dans une perspective d'estimation de la ressource.

Tableau 2. Tableau récapitulatif des données disponibles dans les bases de données ACCESS et EXCEL pour les 25 bassins finalement retenus.

Nom de la station	Code hydro	Surface (km ²)	Période données ACCESS	Nombre de mesures ACCESS	Période données EXCEL	Nombre de mesures EXCEL	Nombre de mesures non redondantes
APANDZO	30543010	6,1	2009-2016	104	1999-2002	275	379
BANDRAZIA	30461610	3,56	NA	0	1995-2002	287	287
BATRINI	30472010	3,45	2009-2016	193	1995-2002	302	495
BOUNGOUMOUHÉ	30458410	2,06	2009-2016	194	1995-2002	287	481
BOUYOUNI BAS	30356410	8,61	2009-2016	277	1995-2015	1236	1254
BOUYOUNI HAUT	30351410	5,36	2009-2016	215	1995-2002	317	532
DEMBENI BAS	30921020	11,89	2009-2016	197	1998-2015	633	637
DEMBENI HAUT	30921010	5,08	2009-2016	129	1997-2002	234	363
DZOUMOGNÉ OUEST	30333320	15,25	2016-2016	2	1995-2000	186	188
DZOUMOGNÉ RETENUE	30330220	7,45	2009-2016	106	2002-2004	98	204
GOULOUE	30131410	2,32	NA	0	1995-2002	308	308
KWALÉ HAUT	30143010	4,03	NA	0	1995-2002	311	311
KWALÉ STATION	30147210	12,07	2009-2016	193	2005-2007	111	304
LONGONI	30361810	2,56	2009-2016	251	1995-2015	781	791
MAPOUÉRA	30333310	2,98	2009-2016	198	NA	0	198
MERESSE	30356810	2,5	2009-2016	261	1995-2015	788	803
M'GOMBANI	30211210	2,03	2009-2016	216	1998-2002	194	410
MOHOGONI	30334510	2,65	2009-2016	254	1999-2012	536	647
M'ROALÉ	30522010	4,57	2009-2016	192	1995-2002	356	548
M'RONABEJA	30733310	1,72	2009-2016	70	2004-2007	159	229
MWALA	30530210	3,26	2009-2016	271	1998-2015	695	714
OUROVENI PONT	30533110	13,88	2009-2016	189	NA	0	189
OUROVENI STATION	30530220	18,72	NA	0	1995-2002	458	458
PASSAMAINTY	30139110	6,49	2010-2016	124	NA	0	124
SOULOU	30512210	2,92	2009-2016	196	1995-2002	290	486

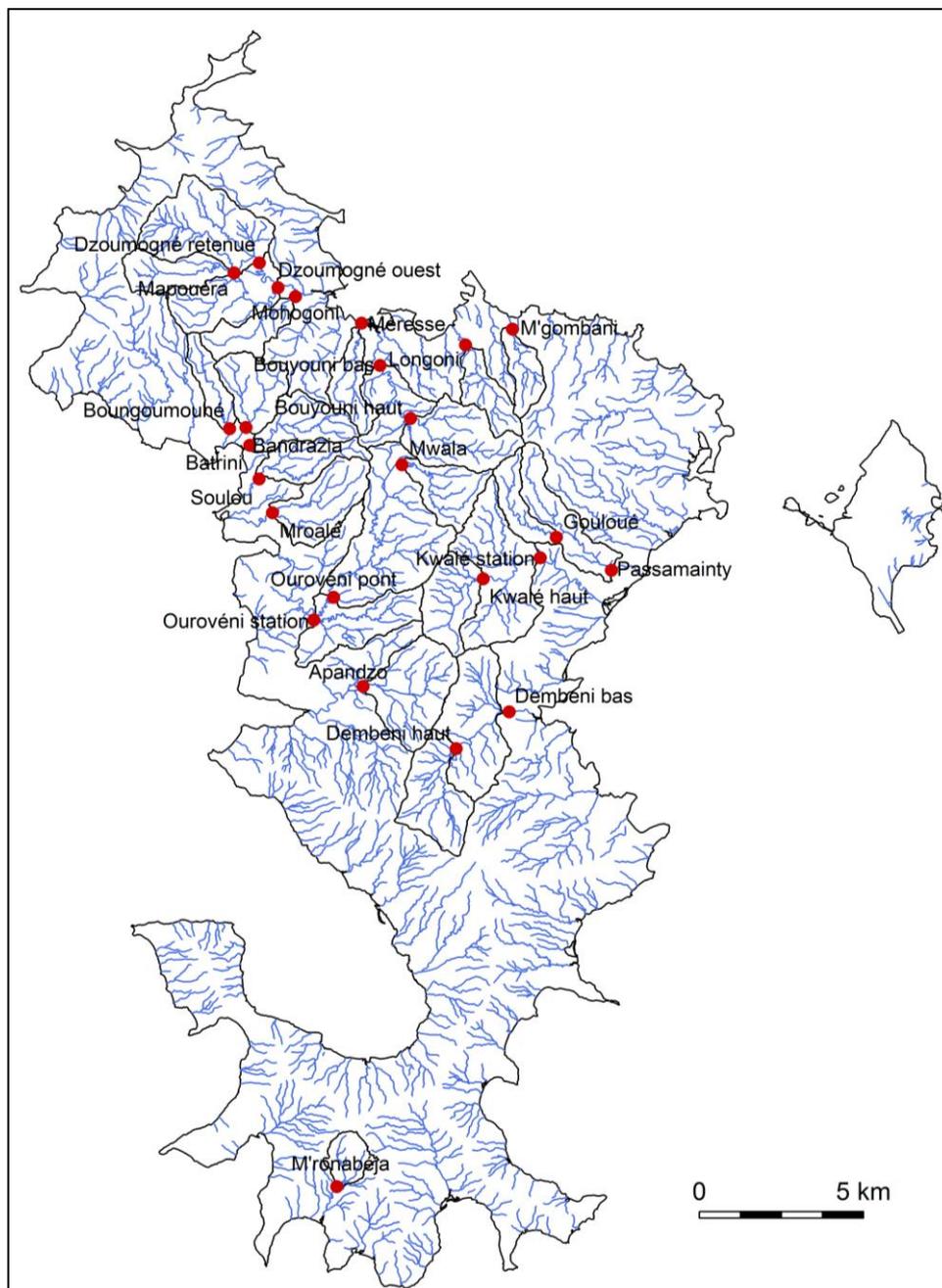


Figure 6. Localisation des 25 bassins versants de l'étude. En point rouge, la localisation de la station hydrométrique et en trait noir, le contour des bassins versants.

2.3 Les données pluviométriques

2.3.1 Origine des données

Les données pluviométriques utilisées dans cette étude sont issues de chroniques de pluie mesurées au niveau de pluviomètres du réseau Météo-France. Pour cette étude, nous avons sélectionné 14 pluviomètres afin d'assurer une répartition relativement homogène des pluviomètres pour l'ensemble des bassins (Figure 7).

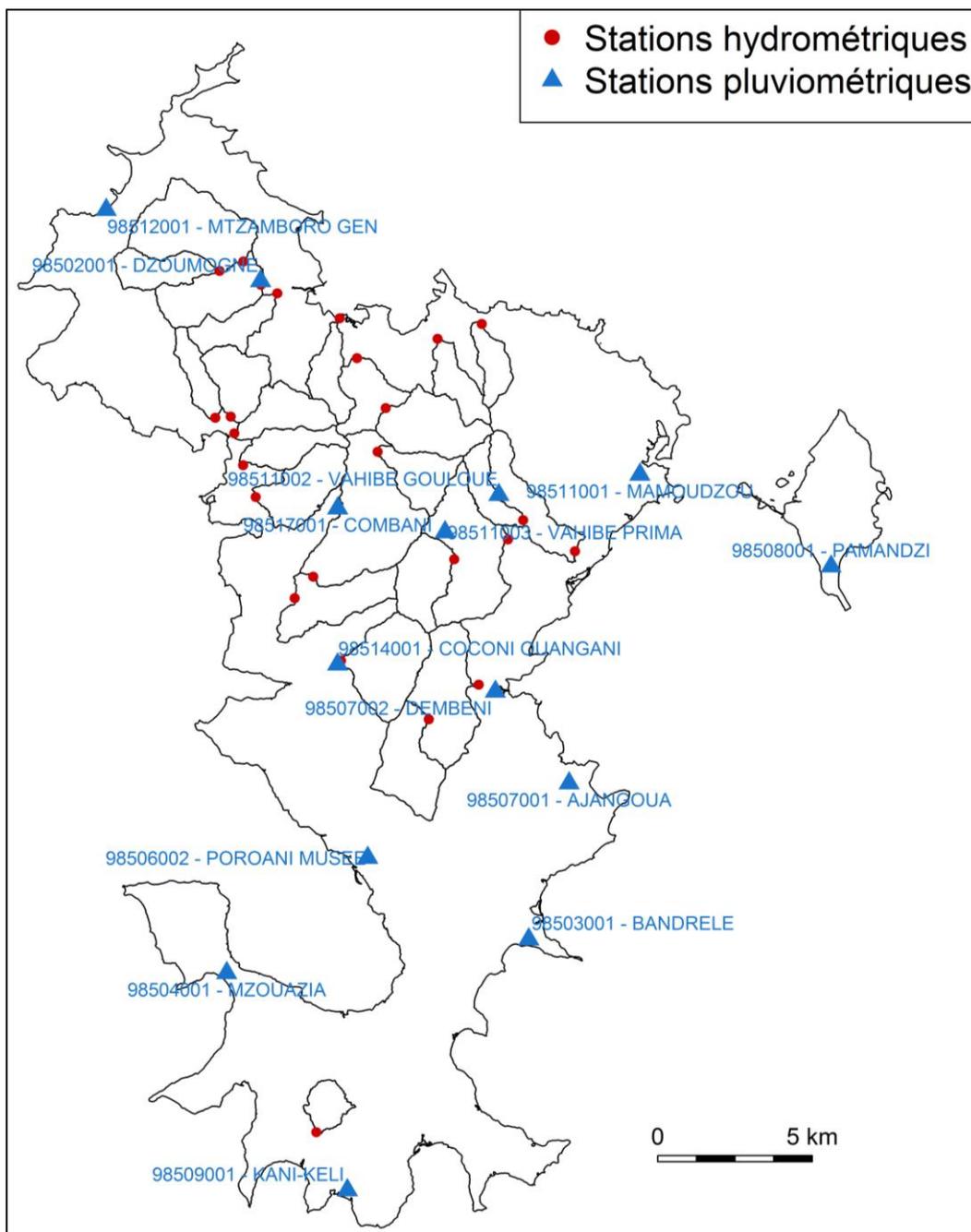


Figure 7. Localisation des stations pluviométriques et des 25 bassins versants de l'étude. En triangle bleu, les stations pluviométriques, en point rouge les exutoires des bassins versants et en trait noir le contour des bassins versants.

Les données, achetées par la DEAL, ont été téléchargées à partir de la Publithèque en ligne de Météo-France pour la période 01/01/1990-30/04/2016 (Tableau 3). La Figure 8 illustre les périodes de disponibilité des données pluviométriques au niveau de chaque poste. On observe sur cette figure qu'au minimum cinq pluviomètres sont disponibles de façon simultanée sur toute la période de l'étude. Ces cinq pluviomètres sont par ailleurs plutôt bien répartis sur l'ensemble du territoire de Mayotte. Au maximum 12 pluviomètres peuvent être utilisés simultanément pour le calcul des pluies de bassin.

Tableau 3 : Stations pluviométriques sélectionnées

CODE	Nom station	Altitude_m	Latitude	Longitude	Début	Fin	Taux de lacunes (%) (1990-2016)
98502001	DZOU MOGNE	24,0	-12,721	45,112	01/01/1961	En_cours	2,3
98503001	BANDRELE	26,0	-12,915	45,192	01/02/1986	En_cours	0,3
98504001	MZOUAZIA	20,0	-12,925	45,102	01/01/1996	En_cours	23,7
98506002	POROANI MUSEE	25,0	-12,891	45,144	01/05/2004	En_cours	54,4
98507001	AJANGOUA	30,0	-12,869	45,204	01/01/1981	NA	32,9
98507002	DEMBENI	20,0	-12,842	45,182	01/01/1994	En_cours	15,5
98508001	PAMANDZI	7,0	-12,805	45,282	01/01/1949	En_cours	0,0
98509001	KANI-KELI	6,0	-12,989	45,138	01/05/1994	En_cours	19,6
98511001	MAMOUDZOU	60,0	-12,778	45,225	01/01/1993	En_cours	11,7
98511002	VAHIBE GOULOUE	152,0	-12,784	45,183	01/01/1992	31/01/2007	59,6
98511003	VAHIBE PRIMA	190,0	-12,795	45,167	07/11/2003	En_cours	53,2
98512001	MTZAMBORO GEN	25,0	-12,7	45,066	01/01/1991	En_cours	12,6
98514001	COCONI OUANGANI	90,0	-12,834	45,135	01/01/1951	NA	15,3
98517001	COMBANI	122,0	-12,788	45,135	01/01/1960	En_cours	0,9

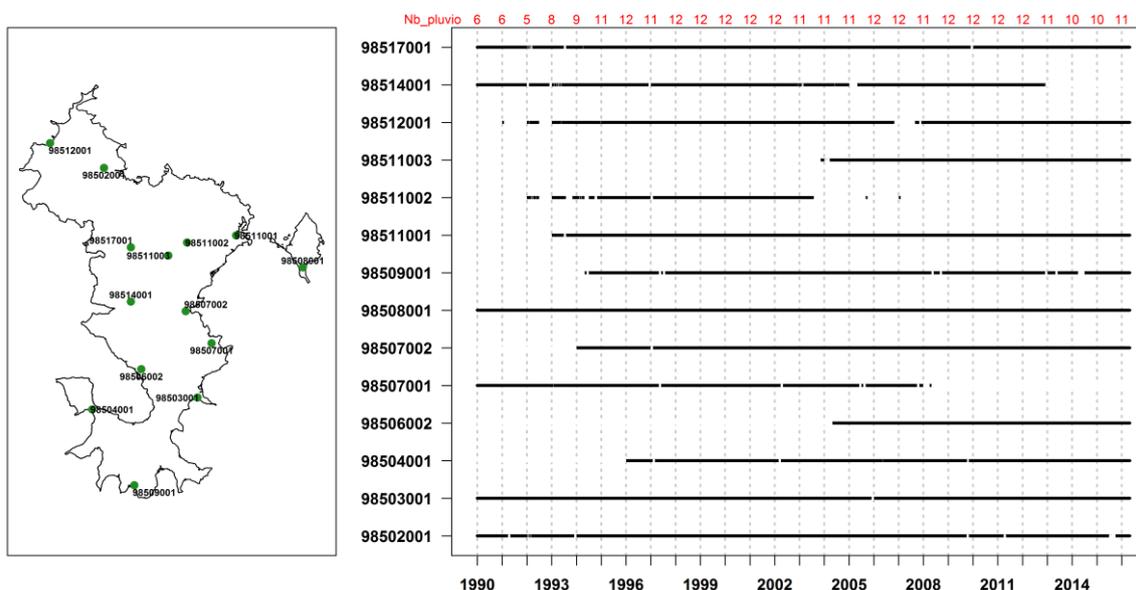


Figure 8. Disponibilité des données de pluie journalière de chaque poste pluviométrique sur la période 1990-2016. Les nombres au-dessus représentent le nombre de pluviomètres ou au moins 90% des données sont disponibles sur l'année.

D'autres données de précipitations, relevées par la DAF, sont disponibles sur la période 1996-2011, sur 10 pluviomètres. La qualité de ces données, qui peut être assez variable, nous ont amené à ne pas utiliser ces données.

2.3.2 Interpolation de la pluie de bassin

Le modèle hydrologique GR4J, utilisé pour reconstituer les séries de débits, nécessite comme variables d'entrée des séries continues de précipitations et d'évapotranspiration potentielle moyennées à l'échelle du bassin versant, à un pas de temps journalier.

Au cours de cette étude, nous avons fait le choix d'effectuer l'interpolation de la pluie de bassin selon la méthode de pondération par l'inverse de la distance (à la puissance 2) (voir par ex. Lebecherel, 2015). Nous sommes conscients que d'autres méthodes d'interpolation plus élaborées, telles que le krigeage, existent. Toutefois, nous avons dans un premier temps décidé d'effectuer l'interpolation de la pluie de bassin par une méthode plus simple, et rapide à mettre en œuvre. De plus, certaines études ont montré que les méthodes d'interpolation dites déterministes comme celle de pondération par l'inverse de la distance, donnaient des résultats similaires ou meilleurs que les méthodes géostatistiques en termes de modélisation hydrologique [Ly et al., 2011; Ruelland et al., 2008]. Otieno et al. [2014] concluent également que malgré son plus haut niveau de complexité, l'utilisation du krigeage ne montre pas une plus grande capacité à estimer la pluie moyenne mensuelle que la méthode de pondération par l'inverse de la distance. Dirks et al. [1998] considèrent aussi que le choix du krigeage, méthode plus complexe et chronophage, ne semble pas être justifié pour l'estimation de pluie journalière, mensuelle ou annuelle lorsque le réseau pluviométrique est dense.

Afin d'appliquer la méthode de pondération par l'inverse de la distance comme méthode d'interpolation de la pluie de bassin, celui-ci est découpé selon une grille de résolution spatiale 5m x 5m (résolution spatiale du MNT) et l'interpolation est effectuée sur chacune des mailles constituant le bassin versant.

L'interpolation de la pluie de bassin est définie selon l'équation suivante :

$$P_{BV} = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N P_{poste}^i \times \frac{1}{d_{poste\ i-maille\ j}^2}}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{poste\ i-maille\ j}^2}} \quad \text{Équation 1}$$

avec P_{BV} : pluie de bassin versant au pas de temps journalier ; P_{poste}^i : pluie du poste i au pas de temps journalier ; $d_{poste\ i-maille\ j}$: distance séparant la maille j du poste i .

La Figure 9 présente la pluviométrie annuelle moyenne déterminée à l'aide de cette méthode sur l'île et sur les 25 bassins versants de l'étude.

Comme présenté dans la Figure 8, la présence ou non de stations pourrait engendrer des biais sur certaines périodes dans l'interpolation de la pluie, particulièrement les années à 1990 1995 où moins de 10 pluviomètres fournissent des données simultanément. Les pluviomètres disponibles sur ces périodes sont néanmoins bien répartis spatialement sur le territoire. Les biais éventuels seraient également lissés par l'agrégation de la pluie à l'échelle des bassins versants.

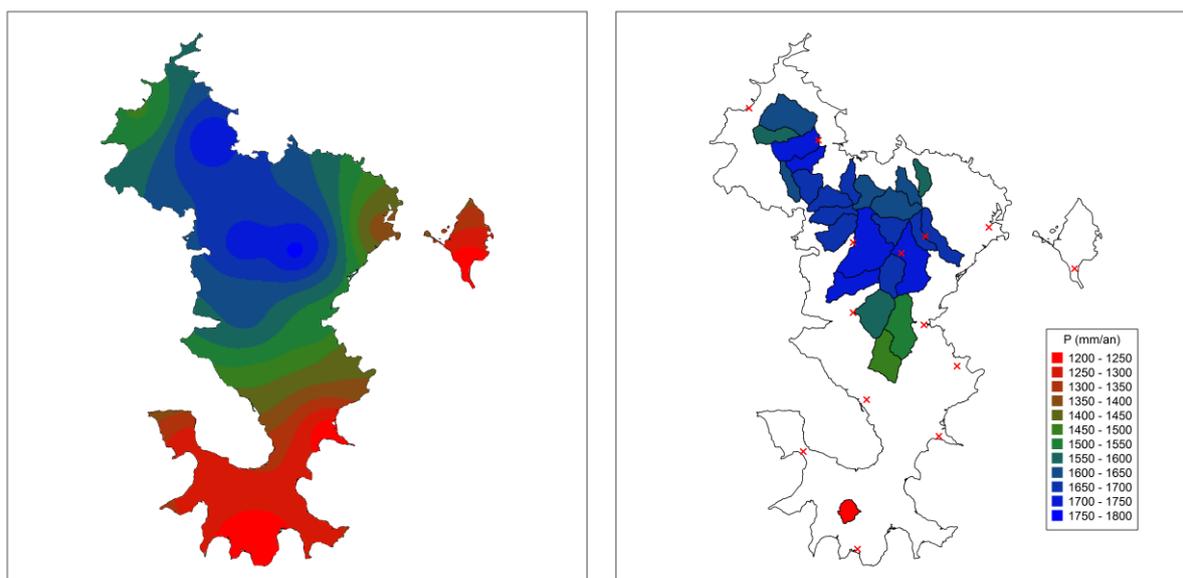


Figure 9. Pluviométrie moyenne annuelle (1990-2015) sur Mayotte et sur les 25 bassins versants mahorais.

Le Tableau 4 récapitule la pluie moyenne annuelle et les quantiles de pluie annuelle pour chaque bassin versant. Ces valeurs sont calculées sur la période 1990-2015. On remarque des pluies qui peuvent être assez variables d'une année sur l'autre, avec des cumuls pluviométriques particulièrement élevés.

Tableau 4 : Caractéristiques des pluies annuelles sur les bassins versants mahorais (période 1990-2015)

Nom de la station	CODE HYDRO	Pluie (mm/an)	Quantile 10%	Quantile 50%	Quantile 90%
GOULOUÉ	30131410	1683	1143	1694	2191
PASSAMAINTY	30139110	1655	1143	1648	2211
KWALÉ HAUT	30143010	1678	1314	1689	2004
KWALÉ STATION	30147210	1727	1247	1753	2110
M'GOMBANI	30211210	1589	1242	1635	1944
DZOUMOGNÉ RETENUE	30330220	1622	1268	1579	2011
MAPOUÉRA	30333310	1591	1253	1531	1990
DZOUMOGNÉ OUEST	30333320	1702	1358	1628	2058
MOHOGONI	30334510	1710	1390	1625	2053
BOUYOUNI HAUT	30351410	1649	1272	1661	2001
BOUYOUNI BAS	30356410	1649	1307	1654	1981
MERESSE	30356810	1662	1360	1578	1918
LONGONI	30361810	1617	1266	1665	1992
BOUNGOUMOUHÉ	30458410	1643	1352	1595	1980
BANDRAZIA	30461610	1668	1360	1615	2001
BATRINI	30472010	1651	1360	1582	1918
SOULOU	30512210	1657	1328	1618	1970
M'ROALÉ	30522010	1687	1355	1657	2040
MWALA	30530210	1693	1278	1674	1998
OUROVENI STATION	30530220	1729	1394	1707	2059

Nom de la station	CODE HYDRO	Pluie (mm/an)	Quantile 10%	Quantile 50%	Quantile 90%
OUROVENI PONT	30533110	1718	1386	1693	2057
APANDZO	30543010	1589	1254	1557	1921
M'RONABEJA	30733310	1228	994	1178	1548
DEMBENI HAUT	30921010	1482	1239	1396	1854
DEMBENI BAS	30921020	1507	1264	1427	1872

La Figure 10 présente, pour chaque année, le rapport entre la pluie annuelle et la pluie moyenne interannuelle sur le bassin versant. Ces cartes permettent de rendre compte des excédents et déficits pluviométriques à l'échelle des bassins versants. Nous retrouvons ici les conclusions d'ANTEA (2012), certaines années sèches ressortent particulièrement bien (1997 et 2001 notamment), avec des déficits pluviométriques observables sur l'ensemble des bassins versants, ainsi que certaines années humides (2002, 2004 et 2008).

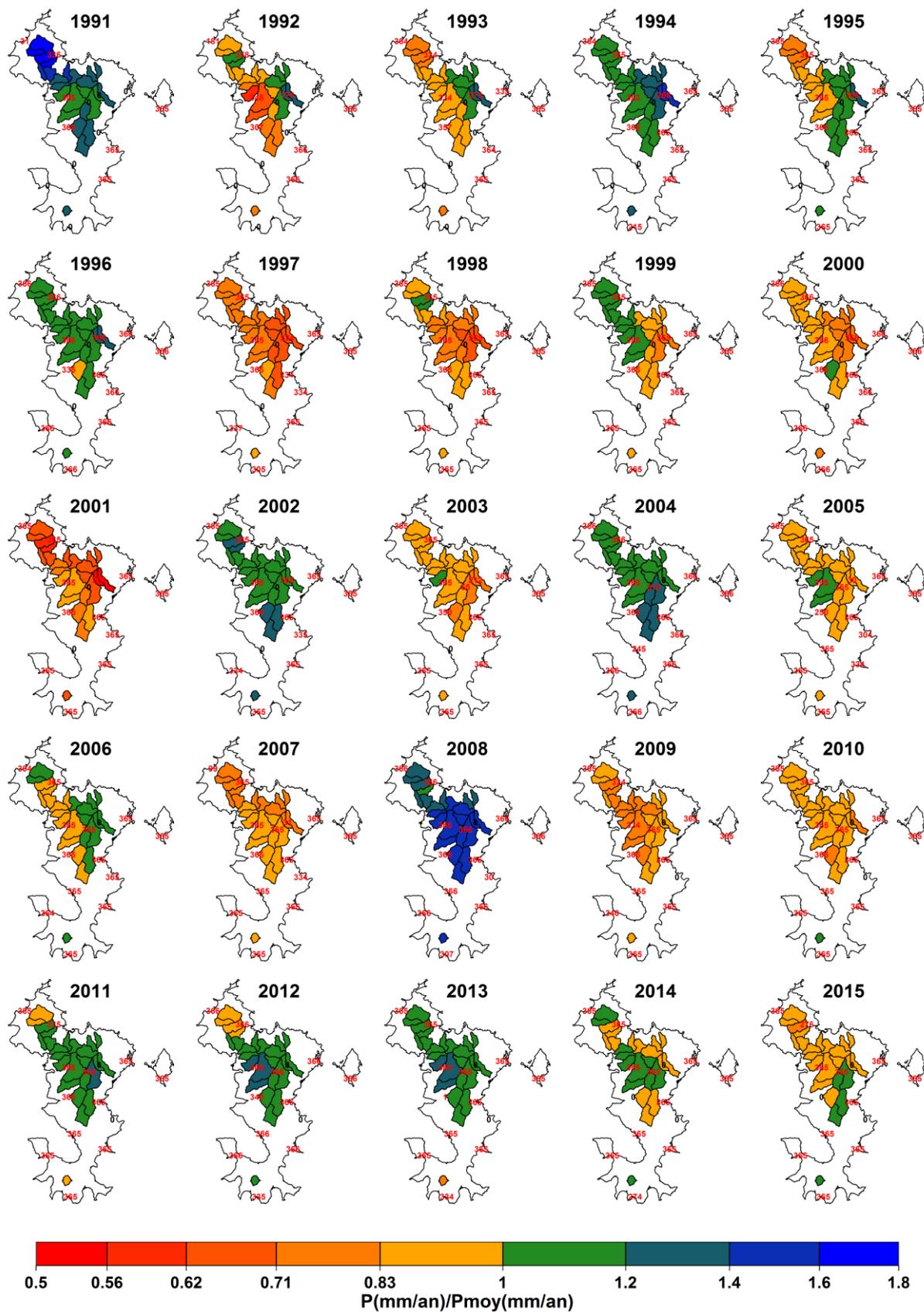


Figure 10 : Rapport entre la pluie annuelle et la pluie moyenne interannuelle pour chaque bassin versant. Le nombre de données pour chaque pluviomètre est indiqué au niveau de leur localisation.

2.4 Les données d'évapotranspiration potentielle

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) nécessaires au fonctionnement du modèle hydrologique pluie-débit GR4J pour la reconstruction de longues chroniques de débit sont des données journalières disponibles sur la période cible, soit dans cette étude la période 1990-2016.

Au cours de cette étude, des données journalières d'ETP Penman, achetées par la DEAL ont été extraites de la Publithèque de Météo France ainsi que des données journalières de température issues de la station Pamandzi. Les données d'ETP de Penman sont des cumuls décennaux à la station de Pamandzi, lissées par interpolation polynomiale au pas de temps journalier, sur la période du 21/11/1998 au 21/04/2016. L'ETP sur la période 01/01/1990 et 20/11/1998 correspond à l'ETP moyenne interannuelle de l'ETP Penman à la station Pamandzi (une courbe journalière moyenne d'ETP est répétée chaque année).

Afin d'observer la sensibilité du modèle hydrologique aux données d'ETP, une seconde formule d'ETP a été utilisée, la formule d'Oudin *et al.* [2005], basée sur la température mesurée à la station de Pamandzi (données de température issues de la Publithèque de Météo France), sur la période du 01/01/1990 au 30/04/2016.

Par ailleurs, d'autres sources de données d'ETP d'origines variées ont été identifiées et répertoriées. Celles-ci proposent des ETP Piche journalières sur l'année 2004 sur la retenue de Combani, ou des moyennes mensuelles d'ETP Penman [ANTEA, 2003; Lapègue, 1999] au niveau de plusieurs stations. Les valeurs de l'étude ANTEA [2003] ont été calculées à partir de 3 stations (Dzoumogné, Coconi et Combani).

Les différentes sources d'ETP ainsi que leurs principales caractéristiques sont récapitulées dans le Tableau 5, et la Figure 11 indique la localisation de ces différentes stations. Nous pouvons tout d'abord remarquer dans le Tableau 5 que ces ETP sont disponibles sur des périodes et à des pas de temps différents, et que seules les ETP de Penman et d'Oudin issues de données extraites récemment de la Publithèque de Météo France sont disponibles au pas de temps journalier et sur la période concomitante avec la période de disponibilité des données de débit et de pluie. Ce tableau indique également que les ETP de Penman de la thèse de Lapègue [1999] ont été reprises par ANTEA [2003] pour l'étude sur le bassin de Bouyouni (valeurs d'ETP identiques).

Tableau 5. Tableau récapitulatif des différentes sources disponibles pour l'étude, ainsi que leurs principales caractéristiques : de gauche à droite, le poste où les mesures ont été effectuées, son altitude, le pas de temps des données d'ETP, la période sur laquelle les données sont disponibles, et les valeurs mensuelles interannuelles d'ETP (mm/j). Respectivement en bleu, vert, orange, les ETP identiques pour les stations Dzoumogné, Combani et Coconi.

Source	Poste	Altitude (m)	Pas de temps	Période	J	F	M	AI	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP Penman Lapègue [1999]	Pamandzi	10	Moyenne mensuelle interannuelle	1951-1980	4,5	3,9	4,5	4,3	4,5	4,1	4,2	4,3	4,7	5,0	5,0	4,8
	M'Tzamboro	10		1984-1985	4,3	2,9	5,1	4,5	4,5	4,1	3,7	4,1	3,7	4,0	4,5	4,2
	Dzoumogné	20		1935-1974	4,0	4,3	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	4,1	4,3	4,2	4,5	4,3
	Mamoudzou	40		1952-1974	3,8	3,2	3,9	4,0	4,0	3,9	3,9	4,2	4,3	4,3	4,4	4,0
	Combani	80		1936-1974	2,3	3,2	2,6	2,8	2,8	2,8	2,4	3,0	2,8	2,6	3,1	3,0

	Coconi	90		1967-1975	3,9	3,0	4,5	4,0	4,0	3,7	3,2	4,0	3,6	3,6	3,9	3,7
ETP Penman ANTEA [2003]	Port de Longoni (Dzoumogné)	40	Moyenne mensuelle interannuelle	-	4,0	4,3	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	4,1	4,3	4,2	4,5	4,3
	Lima Combani (Coconi)	477		-	3,9	3,0	4,5	4,0	3,7	3,1	3,2	4,0	3,6	3,6	3,9	3,7
	Lima Digo (Combani)	148		-	2,3	3,2	2,6	2,8	2,8	2,8	2,4	3,0	2,8	2,6	3,1	3,0
	Dzoumonye (Dzoumogné)	20		-	4,0	4,3	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	4,1	4,3	4,2	4,5	4,3
	Convalescence (Cocani)	332		-	3,9	3,0	4,5	4,0	3,7	3,1	3,2	4,0	3,6	3,6	3,9	3,7
	Combani (Combani)	122		-	2,3	3,2	2,6	2,8	2,8	2,8	2,4	3,0	2,8	2,6	3,1	3,0
	Bandaziana Nord (Coconi)	140		-	3,9	3,0	4,5	4,0	3,7	3,1	3,2	4,0	3,6	3,6	3,9	3,7
ETP Piche	Combani	-	Journalier	2004	2,1	2,5	2	1,8	2,8	3,2	3,2	2,9	2,5	2,5	1,9	1,4
ETP Penman (Météo France)	Pamandzi	-	Journalier	1998-2016 (interpolation entre 1990 et 1998)	5	4,7	4,7	4,8	4,7	4,5	4,4	4,6	4,9	5,4	5,4	5,1
ETP Oudin (Température Météo France)	Pamandzi	-	Journalier	1990-2016	5,6	5,5	5,3	5,3	5,2	5	4,8	4,7	4,8	5,1	5,5	5,7

La Figure 11 présente les ETP moyennes annuelles de chacune de ces sources disponibles et les Figure 12 et Figure 13 présentent les valeurs mensuelles interannuelles des stations de Pamandzi et de Combani respectivement, stations sur lesquelles sont disponibles plusieurs sources d'ETP.

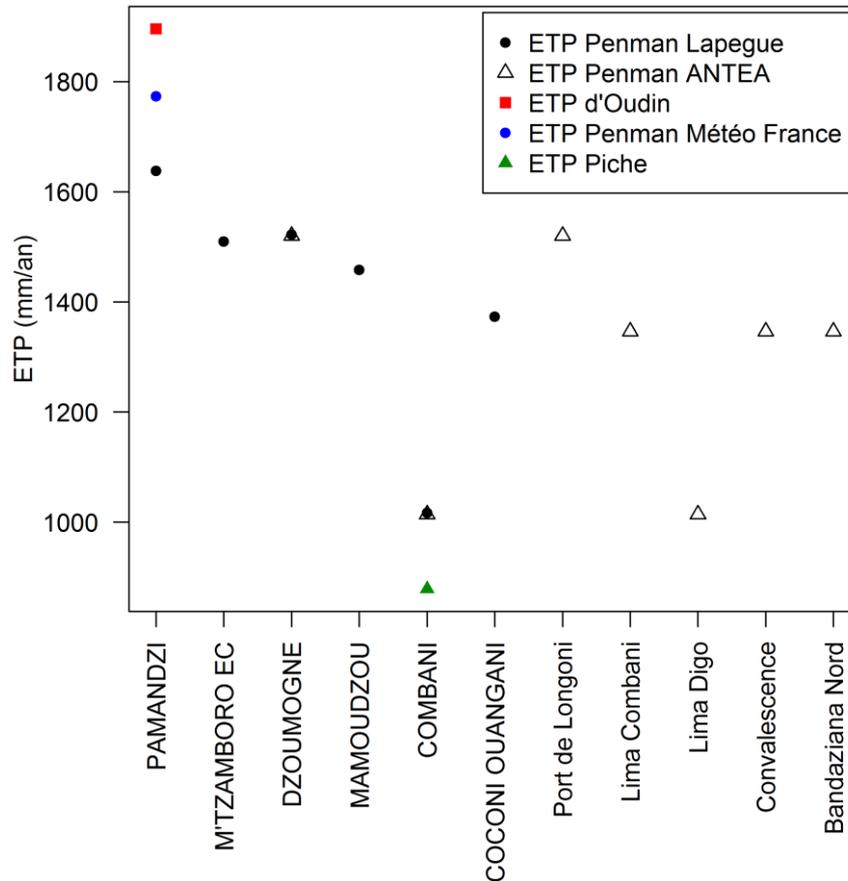


Figure 11. ETP annuelle moyenne (mm/an) aux différentes stations.

Pour la station de Pamandzi (Figure 12), on distingue trois sources d'ETP : ETP Penman de la Publiothèque de Météo France, ETP d'Oudin, et ETP Penman issues de la thèse de Lapègue [1999]. Les cumuls (Figure 11) entre les formules d'Oudin et de Penman sont assez proches (moyenne annuelle de 1770 mm pour Penman contre 1900 mm pour Oudin). Les différences entre les valeurs moyennes annuelles de Penman et Lapègue (respectivement 1770 mm et 1640 mm) sont probablement dues aux périodes différentes sur lesquelles sont calculées ces valeurs (1998-2016 pour Penman décadaire, 1951-1980 pour Lapègue). Les dynamiques dans l'année entre Penman et Lapègue sont similaires (les différences peuvent être dues aux périodes sur lesquelles sont calculées les moyennes), et différentes de celle d'Oudin, qui est un peu supérieure de décembre à juin, peut-être liée à l'absence de prise en compte de l'humidité relative et de la radiation réelle ou du vent.

Pour la station de Combani (Figure 13), deux sources d'ETP sont disponibles mais restent difficiles à comparer en raison de périodes différentes sur lesquelles les données sont disponibles. En effet, l'ETP Piche a été seulement mesurée sur une période d'un an (année 2004) alors que l'ETP de Penman issue de la thèse de *Lapègue* [1999] a été obtenue sur une période d'environ 40 ans.

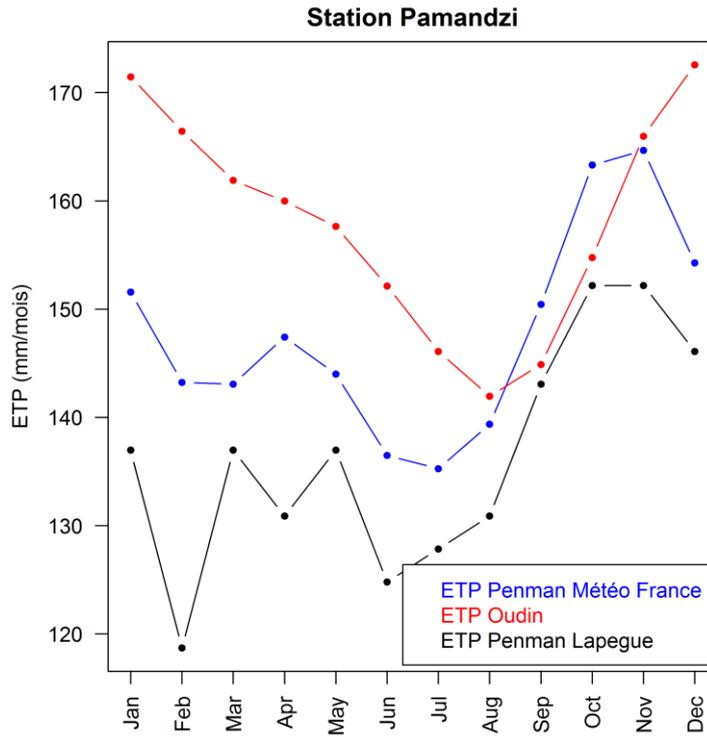


Figure 12. Régimes mensuels d'ETP de la station Pamandzi (mm/mois) pour l'ETP Penman issue de la Publithèque de Météo France, l'ETP d'Oudin *et al.* [2005], et l'ETP Penman issue de Lapegue [1999].

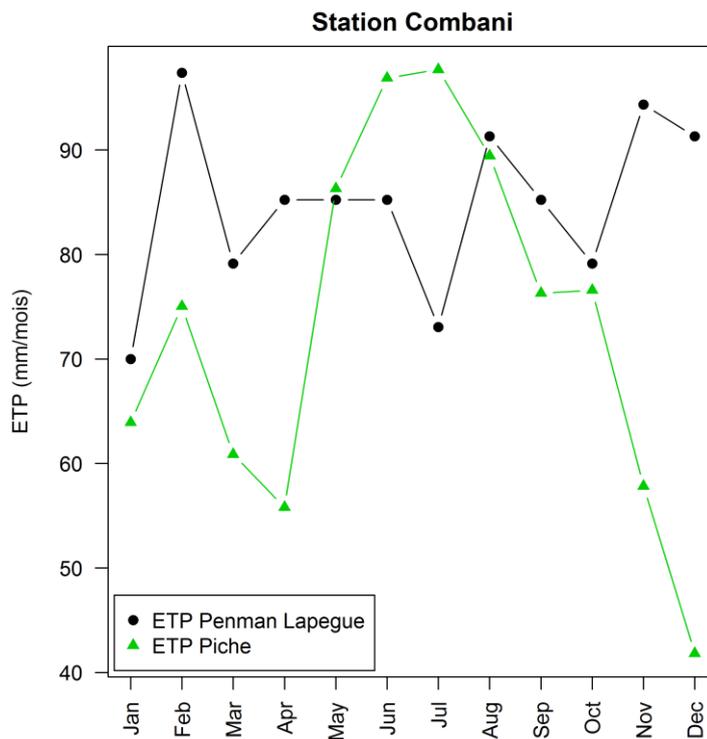


Figure 13. Régimes mensuels d'ETP de la station Combani (mm/mois) pour l'ETP Penman issue de Lapegue [1999] et l'ETP Piche mesurée à la station Combani.

Finalement, dans cette étude, nous avons privilégié les ETP disponibles au pas de temps journalier et sur la période cible 1990-2016, soient l'ETP de Penman issue de la Publithèque de Météo France et

l'ETP d'Oudin calculée à partir des données de température issues de la Publiothèque de Météo France. L'utilisation de l'ETP Penman étant privilégiée par Météo France pour le territoire de Mayotte, nous utiliserons cette ETP pour la simulation des longues chroniques de débit. Toutefois, des analyses de sensibilité du modèle hydrologique et des seuils sécheresse à ces données d'ETP seront par la suite présentées.

2.5 Les données de volume des retenues de Combani et Dzoumogné

Les données de volume utilisées pour la modélisation hydrologique des bassins influencés par les retenues de Combani et Dzoumogné ont été fournies par la DEAL. Les données pour la retenue de Dzoumogné sont disponibles sur la période entre le 15/05/2001 (date de construction de la retenue) et 01/02/2016. Pour la retenue de Combani, les données sont disponibles sur la période entre le 18/01/1998 (date de construction de la retenue) et 01/02/2016.

La retenue Dzoumogné influence les débits des bassins versants de Dzoumogné retenue et Dzoumogné Ouest alors que la retenue de Combani a une influence sur les débits des bassins d'Ourovéni pont et Ourovéni station. Le Tableau 6 synthétise ces informations.

Tableau 6. Récapitulatif des périodes sur lesquelles les données de volume des retenues Dzoumogné et Combani sont disponibles et noms des bassins versants influencés par chacune des retenues.

Retenue	Période des données	Stations influencées
Dzoumogné	15/05/2001 - 01/02/2016	- Dzoumogné Ouest - Dzoumogné retenue
Combani	18/01/1998 - 01/02/2016	- Ourovéni pont - Ourovéni station

A noter que pour la station Dzoumogné Ouest (30330220), les données de volume de la DEAL commencent en 2001 alors que les données de débit ne sont disponibles que jusqu'à fin 2000 (Tableau 7). Le calage du modèle sera donc effectué en dehors de la période de disponibilité des données de volume de la retenue.

Tableau 7. Récapitulatif des données disponibles de débit sur chaque station influencée

Stations	Retenue	Code hydro	Données de débit disponibles
Dzoumogné retenue	Dzoumogné	30330220	02/01/2002 – 17/03/2014
Dzoumogné Ouest	Dzoumogné	30333320	17/10/1995 – 19/12/2000
Ourovéni station	Combani	30530220	16/05/1995 – 30/04/2002
Ourovéni pont	Combani	30533110	15/01/2009 – 26/01/2016

2.6 Fichiers textes récapitulatifs des métadonnées et des données hydroclimatiques par bassin versant

A la suite de la critique des données hydrométriques et de l'interpolation de la pluie de bassin versant, nous avons regroupé les chroniques de pluie, de débit et d'ETP dans un seul fichier texte par bassin versant (voir exemple à la Figure 14).

Dans ces fiches, sont indiquées les métadonnées de chaque bassin versant : code Hydro, code DEAL, nom de la station, superficie, coordonnées de la station fournies par la DEAL et coordonnées de la station replacées suite au traitement MNT par Irstea. Y figurent également les sources des données utilisées, les indices de validité de chaque valeur débit suite à la critique des données (bon, douteux ou inconnu), ainsi qu'un indice permettant de connaître la base de données dont sont issues les données de débit (Excel ou Access).

```

-----
Date de création du fichier : 2016-10-18 18:20:15
Données hydrologiques : Données DEAL NAVOTTE Février 2016
Données pluviométriques : Extraction bibliothèque Météo-France en Mai 2016
Caractéristiques (1) : Mailles 5x5 m
Données ETP Penman-Monteith : Données décennales à la station Pamandzi sur la période 21/11/1998-21/04/2016
Caractéristiques (1) : Extraction bibliothèque Météo-France en Septembre 2016
Caractéristiques (2) : Extension: Courbe journalière moyenne interannuelle de l'ETP Penman à la station Pamandzi répétée chaque année sur la période 01/01/1990-20/11/1998
Données ETP Oudin : Calculée à partir de données de température issue du poste de Pamandzi sur la période 01/01/1990-30/04/2016
Caractéristiques (1) : Extraction de la température sur la bibliothèque Météo-France en Septembre 2016
-----
Code BV : 30131410
Code DEAL : C3
Nom BV : GOULOUÉ
Superficie bassin : 2.32 ; 2.33 ; (Surface IRSTEA ; Surface DEAL)
Coordonnées stations : S20650.00 ; 8585915.00 ; NA ; (Coordonnées X-Y IRSTEA replacées sur plan de drainage ; Z : altitude en mètres)
Coordonnées stations : S20651.21 ; 8585890.01 ; 108.00 ; (Coordonnées X-Y DEAL ; Z : altitude en mètres)
-----
Champs
Date : AAAA-MM-JJ
Q : débit (m3/s)
Val_Q : code de validité du débit : '0' douteux ; '1' bon ; '2' inconnu
Pro_Q : code de provenance BdD Q : '0' Excel ; '1' Access
P : pluie de bassin (mm)
ETP_P : évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith (mm)
ETP_O : évapotranspiration potentielle de Oudin (mm)
-----
| Date | Q | Val_Q | Pro_Q | P | ETP_P | ETP_O |
|-----|---|-----|-----|---|-----|-----|
| 1990-01-01 | NA | NA | NA | 27.3 | 5.219 | 5.287 |
| 1990-01-02 | NA | NA | NA | 25.3 | 5.246 | 5.216 |
| 1990-01-03 | NA | NA | NA | 18.4 | 5.267 | 5.163 |
| 1990-01-04 | NA | NA | NA | 1.3 | 5.282 | 5.281 |
| 1990-01-05 | NA | NA | NA | 0.6 | 5.291 | 5.554 |
| 1990-01-06 | NA | NA | NA | 0.1 | 5.294 | 5.569 |
| 1990-01-07 | NA | NA | NA | 0.0 | 5.291 | 5.549 |
| 1990-01-08 | NA | NA | NA | 7.6 | 5.281 | 5.614 |
| 1990-01-09 | NA | NA | NA | 7.3 | 5.266 | 5.285 |
| 1990-01-10 | NA | NA | NA | 19.9 | 5.244 | 5.419 |
| 1990-01-11 | NA | NA | NA | 6.3 | 5.114 | 5.536 |
| 1990-01-12 | NA | NA | NA | 13.6 | 5.086 | 5.241 |

```

Figure 14. Exemple d'un fichier texte de bassin versant regroupant les métadonnées en en-tête, puis les chroniques des données hydroclimatiques du bassin.

2.7 Fiches graphiques récapitulatives des données par bassin versant

Pour chaque bassin versant, des fiches graphiques récapitulatives des données de pluie et de débit disponibles ont été créées (voir l'exemple de la Figure 15 pour la station Dembeni bas). Ces fiches graphiques permettent d'identifier visuellement les périodes où l'on dispose de données pluviométriques et hydrométriques en précisant l'indice de validité de ces dernières.

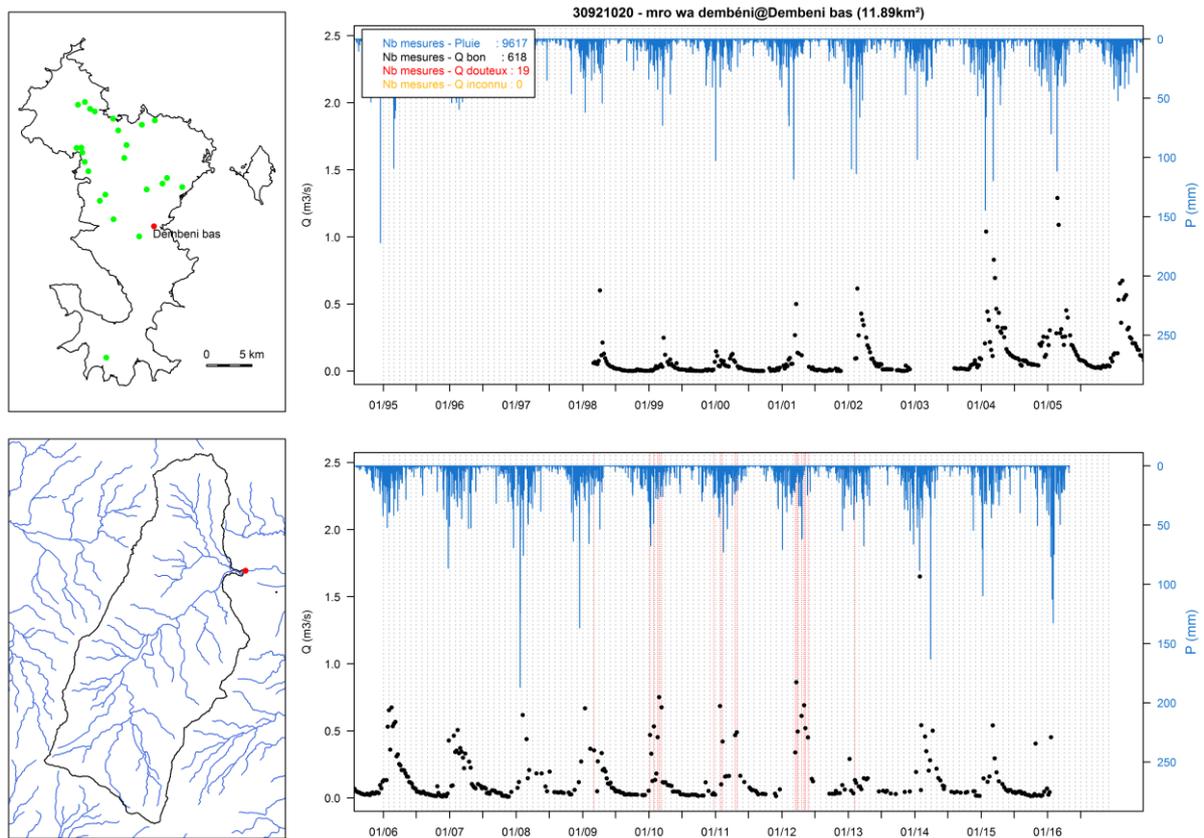


Figure 15. Exemple de fiche récapitulative des données critiquées par bassin versant. En noir, le débit observé et en bleu la pluie de bassin interpolée. En pointillé rouge, les données de débit jugées douteuses après l'étape de critique des données et en pointillé orange, les données de débit dont on ne peut identifier la fiabilité.

3 Modélisation hydrologique

3.1 Méthodologie pour la reconstruction des chroniques de débit

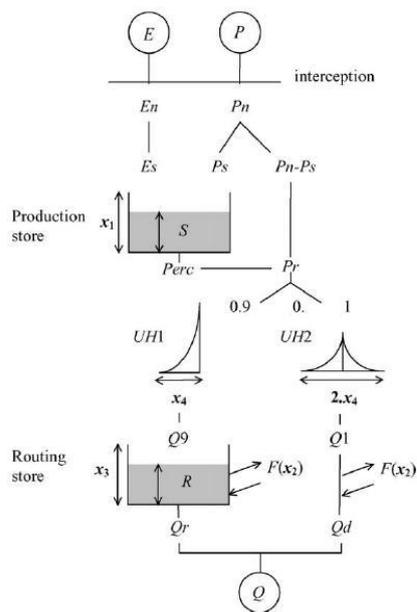
3.1.1 Modélisation hydrologique

3.1.1.1 Le modèle hydrologique GR4J

Le modèle hydrologique GR4J [Perrin et al., 2003], modèle journalier continu avec quatre paramètres libres, a été utilisé au cours de cette étude. Le modèle GR4J est un modèle à réservoir global, l'apparentant à des modèles conceptuels malgré son mode de développement empirique. Il possède deux réservoirs : un réservoir de production, qui calcule une pluie efficace, et un réservoir de routage combiné à un hydrogramme unitaire pour le transfert d'eau au sein du bassin. Les entrées du modèle sont des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, mesurées et calculées à l'échelle du bassin versant.

La Figure 16 présente la structure du modèle GR4J ainsi que ses quatre paramètres libres.

Un avantage de ce modèle dans des contextes où l'on dispose de peu de données ou pour des objectifs de régionalisation, réside dans son faible nombre de paramètres libres, limitant les problèmes d'identifiabilité des paramètres.



Paramètres du modèle :

X1 : capacité maximale du réservoir de production [mm]

X2 : coefficient d'échange souterrain [mm/j]

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage [mm]

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire [j]

Figure 16. Structure et paramètres du modèle pluie-débit GR4J

3.1.1.2 Prise en compte des retenues

Le modèle hydrologique GR4J avec l'inclusion d'un réservoir image correspondant au lac-réservoir (Figure 17) permet de reproduire le comportement « naturel » ou peu anthropisé des bassins versants. Les débits à l'aval des retenues collinaires sont fortement influencés par les lâchers d'eau en aval. Le module de prise en compte des barrages développé par Payan et al. (2008) est ainsi utilisé pour prendre en compte ces influences dans le modèle hydrologique et éviter que les paramètres du modèle ne soient trop contraints par la présence de ces retenues. Ce module représentant le lac-réservoir est appelé réservoir image. La variable caractérisant ce réservoir image correspond à la variation de volume stocké dans le réservoir. Dans notre étude, ces valeurs sont calculées quotidiennement grâce aux données de volume fournies par la DEAL. Payan et al. (2008) ont montré que dans la majorité de leurs tests l'inclusion du réservoir image dans GR4J s'est montrée la plus efficace en moyenne lorsque son point d'alimentation se situait au niveau du réservoir de production, S, et que son point de rejet se situait au niveau du réservoir de routage, R (Figure 17).

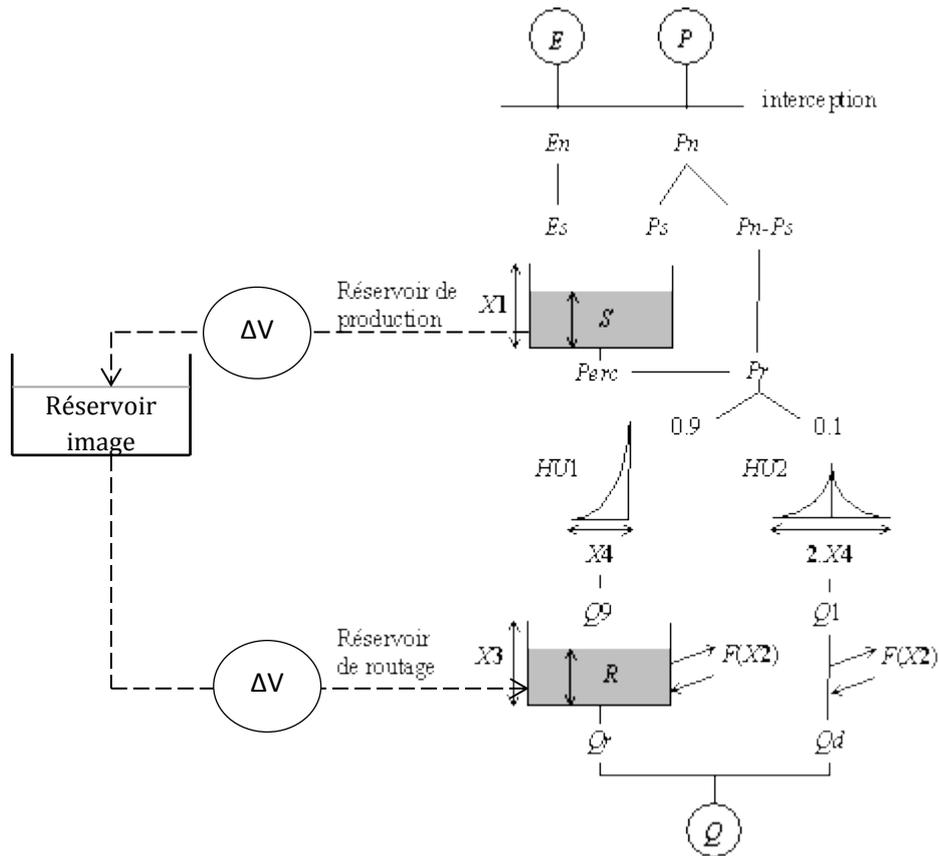


Figure 17. Schéma du modèle GR4J avec inclusion d'un réservoir image correspondant au lac-réservoir

Sur le bassin versant de la retenue de Dzoumogné, une partie du débit de la rivière de la Mro Wa Mjihari à Mapouéra est dérivée vers la rivière Bandrani (qui alimente la retenue de Dzoumogné) par un système de captage situé juste à l'aval de la station de mesure de la Mro Wa Mjihari à Mapouéra (30333310) (Figure 18). D'autre part, la rivière Mahojani est également dérivée vers la retenue de Dzoumogné.

Les observations de terrain montrent qu'en période de basses eaux, le débit de la Mapouéra et de la Mahojani (qui est dérivée vers Mapouéra) sont entièrement captés et alimentent la retenue de Dzoumogné. En période de hautes eaux, une partie du débit est dérivée, l'autre partie suit le cours naturel. Ceci est à prendre en compte pour déterminer le volume d'eau dérivée vers la retenue de Dzoumogné.

Une estimation grossière du volume d'eau maximal pouvant être acheminé vers la retenue de Dzoumogné via le chenal de dérivation a été fournie par la SMAE et est évaluée à environ $1500 \text{ m}^3/\text{h}$, soit environ 420 L/s . Ce débit étant supérieur au débit maximum simulé sur le bassin de la Mapouéra et n'ayant pas de moyen plus précis afin d'évaluer le volume effectivement dérivé vers la retenue, nous faisons l'hypothèse que toute l'eau de la Mapouéra et de la Mahojani est dérivée vers la retenue de Dzoumogné afin de modéliser le débit sur les bassins de Dzoumogné retenue et Dzoumogné Ouest (influencé également par la retenue).

Ceci est pris en compte par la modèle au niveau de la détermination de la variation de volume sur la retenue :

- Habituellement, nous avons $\Delta V_i = V_i - V_{i-1}$ (variation de volume entre le jour i et le jour $i-1$)

Dans le cas de la retenue de Dzoumogné, on aura $\Delta V_i = V_i - V_{i-1} - V_{Map} - V_{Mah}$ (avec V_{Map} : le volume dérivée depuis la Mapouéra et V_{Mah} : le volume dérivé depuis la Mahojani)

Le volume de Mapouéra est déterminé à partir des simulations de débit par le modèle GR4J sur ce bassin et celui de Mahojani n'étant ni observé ni modélisé correspond au débit de la Mapouéra multiplié par un rapport de surface entre les deux bassins.



Figure 18. a) Schéma du captage de Mapouéra ; b) Grille de captage ; c) Regard et passage à gué

3.1.2 Calage des paramètres du modèle hydrologique

Les paramètres du modèle GR4J ne peuvent être obtenus directement à partir de caractéristiques physiques observées/mesurées. Ils ont besoin d'être calés (dans le cas de bassins jaugés). Le calage des paramètres d'un modèle consiste à chercher des valeurs de paramètres donnant les simulations les plus satisfaisantes possibles (i.e., on cherche les paramètres du modèle qui minimisent l'écart entre la série des débits simulés et la série des débits observés).

Le calage des paramètres s'effectue ainsi à partir des données de débit observées à l'exutoire du bassin versant. Dans notre étude, le modèle est calé sur chaque bassin versant sur les données disponibles jugées fiables (suite à la critique de données) entre janvier 1995 et janvier 2016 (utilisant un algorithme combinant exploration exhaustive de l'espace des paramètres (phase de « préfiltrage ») et recherche locale de l'optimum, particulièrement efficace pour ce modèle [Edijatno et al., 1999; Mathevet, 2005]. Cette méthode de calage permet de trouver les paramètres du modèle qui maximisent une fonction objectif donnée (il s'agit d'un critère de satisfaction représentatif de l'objectif de modélisation).

La fonction objectif utilisée pour l'optimisation du modèle GR4J est le critère de *Nash et Sutcliffe* [1970] (*NS*) calculé sur la racine carrée des débits. Bien que l'objectif de cette étude se porte davantage sur la détermination de valeurs seuil de sécheresse, la faible disponibilité des données en période de hautes eaux nous encourage à utiliser un critère privilégiant à la fois la qualité des simulations des bas et des hauts débits [Oudin et al., 2006] afin d'avoir une meilleure estimation du bilan en eau global du bassin. Le critère de *Nash et Sutcliffe* [1970] varie entre $]-\infty;1]$, sachant qu'un modèle très performant a un critère de Nash proche de 1, et lorsque les écarts entre débits observés et simulés sont importants, le critère devient négatif.

Afin d'aider le calage des paramètres, une deuxième fonction objectif combinant le critère de Nash et l'erreur relative sur le volume [Lindström, 1997] a également été testée. Ces tests de comparaison des deux fonctions objectifs ont montré que les performances et les paramètres du modèle étaient peu sensibles à l'utilisation de l'une ou l'autre des fonctions objectifs et que de manière générale moins bonnes performances étaient obtenues avec la fonction objectif combinant le critère de Nash et l'erreur relative sur le volume. Nous avons donc conservé le critère de *Nash et Sutcliffe* [1970] (*NS*) calculé sur la racine carrée des débits pour la suite de l'étude comme fonction objectif et critère d'évaluation du modèle.

3.1.3 Initialisation des états internes du modèle

Afin d'initialiser les états internes du modèle en amont du calage ou de la simulation, une période d'initialisation est nécessaire. Durant cette période, seules les données de pluie et d'ETP sont utilisées par le modèle et ce dernier « tourne » avec un jeu de paramètre initial non calé.

De premières simulations préliminaires ont montré que certains bassins versants montraient quelques difficultés à initialiser les états du modèle lorsque moins de cinq années de données observées étaient utilisées. Une période d'initialisation des états internes du modèle trop courte peut en effet engendrer des incertitudes sur la simulation des débits en début de période de calage ou de simulation, d'autant plus quand aucune donnée de débit observé n'est disponible en début de période.

Dans cette étude, dans le but d'exploiter au maximum les données observées et de conserver une période de calage et de simulation la plus longue possible, les données de pluie et d'ETP de la période de mise en route du modèle sont des moyennes journalières interannuelles de débits simulés répétées 20 fois (soit une année moyenne répétée 20 fois fournissant ainsi 20 ans de données entre 1970 et 1989). Cette période de mise en route est complétée par 4 ans de données de pluie et d'ETP observées pour le calage des paramètres (01/01/1990-31/12-1994) et d'un an de données observées pour la simulation d'une longue chronique de débit (01/01/1990-31/12-1990).

3.2 Performances du modèle lors du calage des paramètres (1995-2016)

La Figure 19 et le Tableau 8 présentent les performances obtenues par bassin versant lors du calage des paramètres du modèle GR4J (critère de *Nash et Sutcliffe* [1970] calculé sur la racine carrée des débits (NS sqrtQ)), ainsi que les paramètres optimisés dans le cas où l'ETP de Penman est utilisée en entrée du modèle (ETP préconisée par Météo France) pour le Tableau 8 .

On peut constater que les paramètres représentant les capacités des réservoirs de production (X1) et de routage (X3), ainsi que le coefficient d'échange souterrain (X4) peuvent prendre des valeurs très élevées. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que lors du calage, le modèle en essayant de boucler le bilan serait obligé de « tirer » sur les valeurs de paramètres, sans pour autant atteindre le « vrai » optimum. Toutefois, l'utilisation de la fonction objectif combinant critère de Nash et l'erreur relative sur le volume ne permet pas d'obtenir des ordres de grandeur de paramètres qu'on obtient habituellement.

De manière générale, les performances du modèle sont variables d'un bassin à un autre. De bonnes performances (critère de Nash supérieur à 0,70) sont obtenues pour les bassins d'Ourovéni station (30530220) et d'Ourovéni pont (30533110) ainsi que pour Passamainty (30139110), Kwalé station (30147210), M'Roalé(30522010), Dembeni haut (30921010) et Dembeni bas (30921020). Par ailleurs, de moins bonnes performances (critère de Nash inférieur à 0,5) sont obtenues pour les bassins de Dzoumogné retenue (30330220), Mohogoni (30334510), Méresse (30356810), Longoni (30361810) et M'Ronabeja (30733310).

Tableau 8. Tableau présentant les performances du modèle GR4J en calage (NS sqrtQ) ainsi que les paramètres calés sur la période 1995-2016. En vert, les critères de Nash supérieurs à 0,7 et en rouge les critères de Nash inférieurs à 0,5.

Code Hydro	Nom de la station	NS sqrtQ	X1 [mm]	X2 [mm/j]	X3 [mm]	X4 [j]
30131410	GOULOUE	0,532	1224,15	0,84	45,15	1,19
30139110	PASSAMAINTY	0,717	1881,83	2,73	157,59	1,20
30143010	KWALÉ_HAUT	0,562	2835,57	-0,97	129,02	1,47
30147210	KWALÉ_STATION	0,733	1603,59	-4,50	152,93	1,46
30211210	M'GOMBANI	0,689	6836,29	1,06	112,17	1,87
30330220	DZOUMOGNÉ_RETENUE	0,350	1588,63	-58,79	304,80	4,74
30333310	MAPOUÉRA	0,551	13173,09	0,14	0,22	1,43
30333320	DZOUMOGNÉ_OUEST	0,541	3982,20	-75,86	309,60	0,93
30334510	MOHOGONI	0,402	19732,06	1,74	678,58	0,50
30351410	BOUYOUNI_HAUT	0,602	5825,50	0,59	97,51	2,47
30356410	BOUYOUNI_BAS	0,678	7785,36	-0,04	164,02	3,17
30356810	MERESSE	0,489	4760,82	0,48	23,99	1,28
30361810	LONGONI	0,320	188,51	-0,17	16900,27	3,00
30458410	BOUNGOUMOUHÉ	0,644	4432,62	-9,66	610,92	3,08
30461610	BANDRAZIA	0,661	3352,61	-32,36	270,03	1,26
30472010	BATRINI	0,667	5271,13	0,68	212,72	2,52
30512210	SOULOU	0,540	7044,48	-10,86	749,95	0,50

Code Hydro	Nom de la station	NS sqrtQ	X1 [mm]	X2 [mm/j]	X3 [mm]	X4 [j]
30522010	M'ROALÉ	0,719	5115,34	-0,94	376,15	1,99
30530210	MWALA	0,525	1380,22	1,51	54,05	1,00
30530220	OUROVENI_STATION	0,823	2018,28	-3,44	225,88	2,08
30533110	OUROVENI_PONT	0,846	1199,91	-5,09	482,99	1,12
30543010	APANDZO	0,608	1383,51	-12,57	259,22	2,38
30733310	M'RONABEJA	0,412	6836,29	0,12	69,41	2,00
30921010	DEMBENI_HAUT	0,710	1408,10	1,13	98,49	1,90
30921020	DEMBENI_BAS	0,748	2121,76	0,75	60,34	2,08

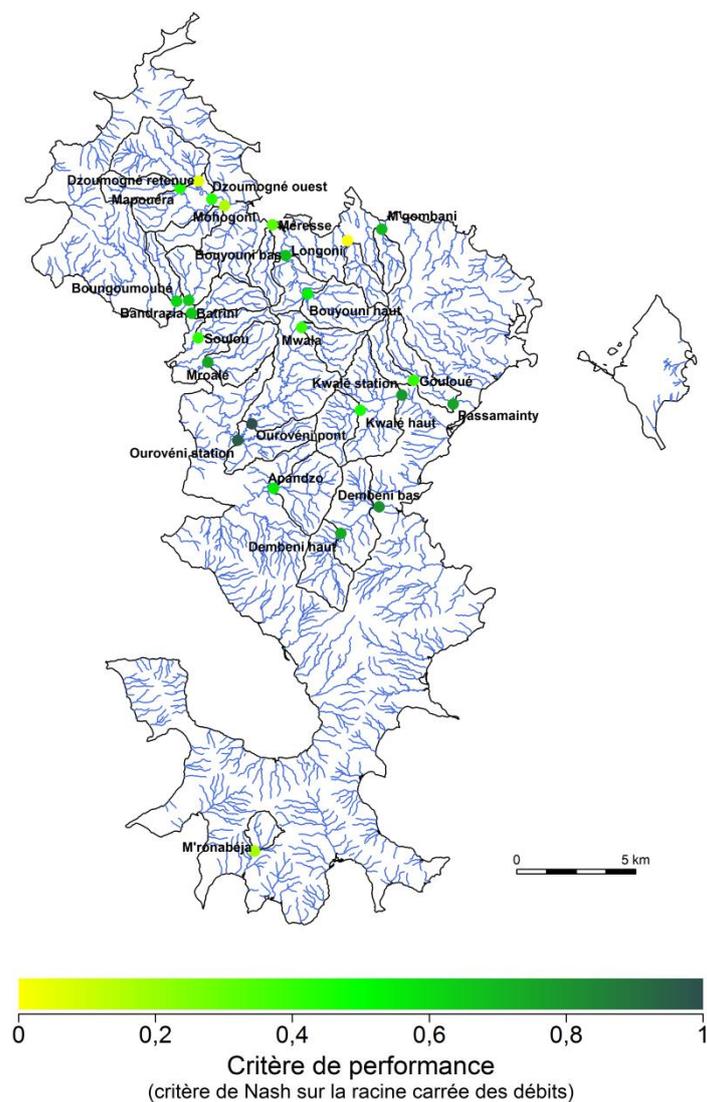


Figure 19. Cartographie des performances de simulation des débits journaliers en calage

3.3 Performances du modèle lors de la simulation d'une longue chronique (1991-2016)

La simulation d'une longue chronique de débit a été réalisée sur la période 01/01/1991-30/04/2016 avec 21 années de mise en route du modèle en amont de la période de simulation et avec l'ETP de Penman utilisée en entrée du modèle.

3.3.1 Etude des chroniques de débits simulés

Dans cette partie, nous allons présenter les simulations de débit par le modèle GR4J de quelques bassins non influencés par les retenues.

La Figure 20 et la Figure 22 présentent les chroniques de débits simulés et observés pour les bassins de Kwalé haut et de Mwala respectivement. Ces figures présentent également les régimes des débits simulés ainsi que deux graphiques permettant de comparer ces deux chroniques de débits. Pour ces deux bassins, on observe que les écarts entre débits simulés et observés sont relativement faibles. Les courbes de distribution des deux chroniques de débits sont très proches (avec une différence un peu plus marquée au niveau des très bas débits) et le graphique présentant les débits observés en fonction des débits simulés montre des différences limitées entre observation et simulation.

La Figure 21 et la Figure 23 présentent un zoom sur une année des chroniques simulées et observées respectivement pour les bassins de Kwalé haut et de Mwala. Ces graphiques plus détaillés permettent de mieux nous rendre compte du comportement du modèle.

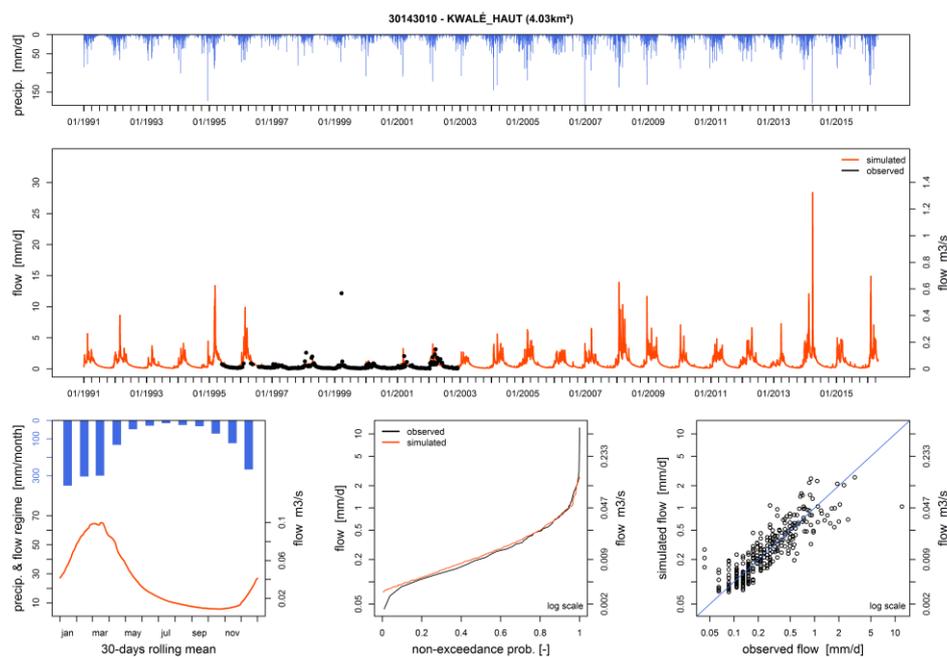


Figure 20. Résultat de la simulation de débit obtenue avec le modèle GR4J avec le module réservoir sur la période 1991-2016 pour le bassin de Kwalé haut. En haut en bleu, l'histogramme des pluies ; au milieu, la chronique observée en point noir et simulée en trait rouge ; en bas à gauche, les régimes de pluie et de débit simulé ; en bas au milieu, les distributions des débits simulés en rouge et observés en noir ; en bas à droite, les débits simulés en fonction des débits observés.

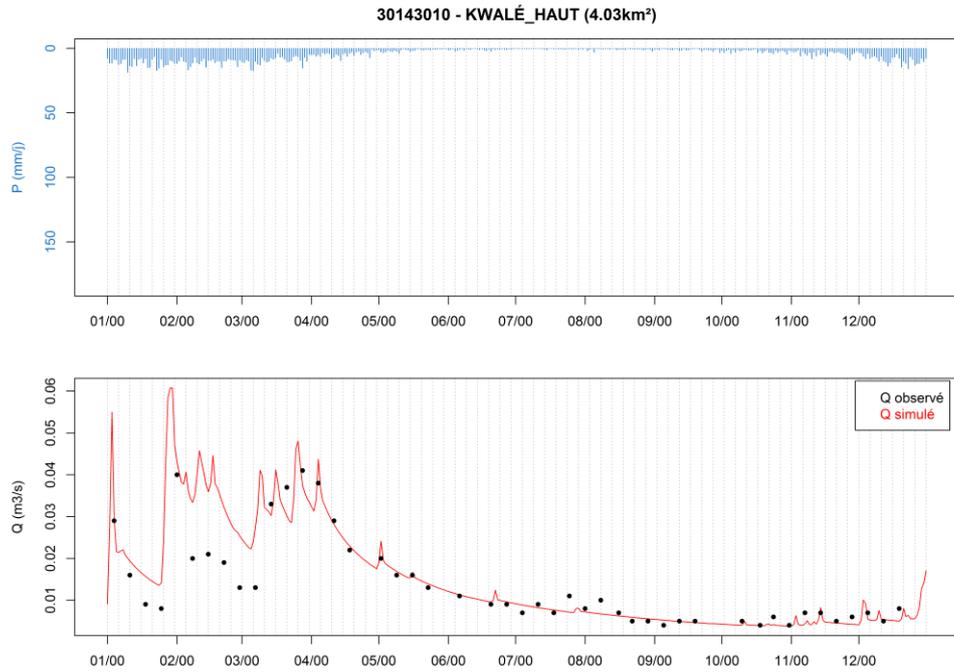


Figure 21. Débits simulés et observés de l'année 2000 pour le bassin de Kwalé haut.

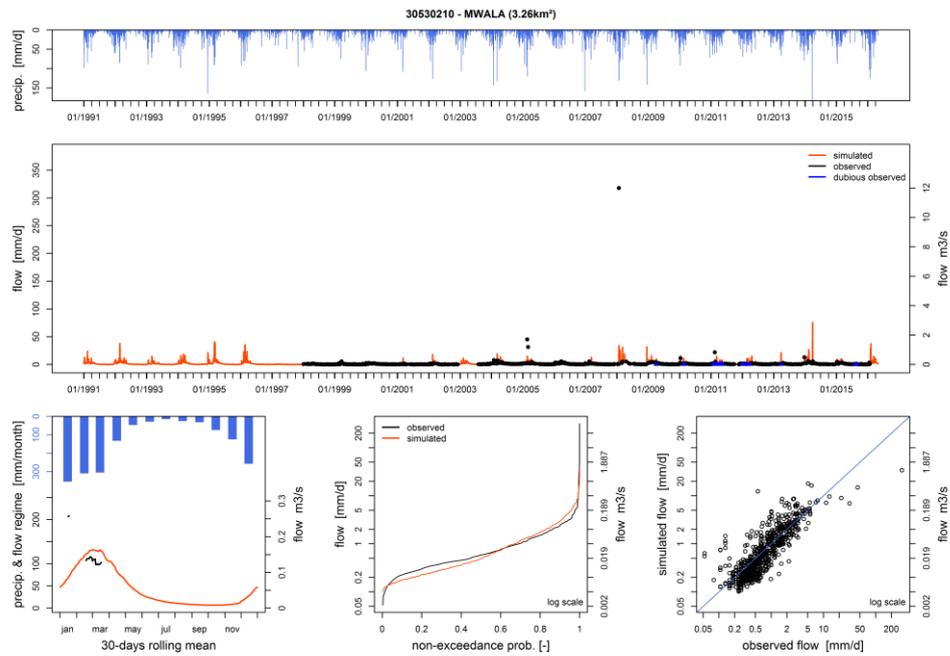


Figure 22. Résultat de la simulation de débit obtenue avec le modèle GR4J avec le module réservoir sur la période 1991-2016 pour le bassin de Mwala. En haut en bleu, l'historique des pluies ; au milieu, la chronique observée en point noir et simulée en trait rouge ; en bas à gauche, les régimes de pluie et de débit simulé ; en bas au milieu, les distributions des débits simulés en rouge et observés en noir ; en bas à droite, les débits simulés en fonction des débits observés.

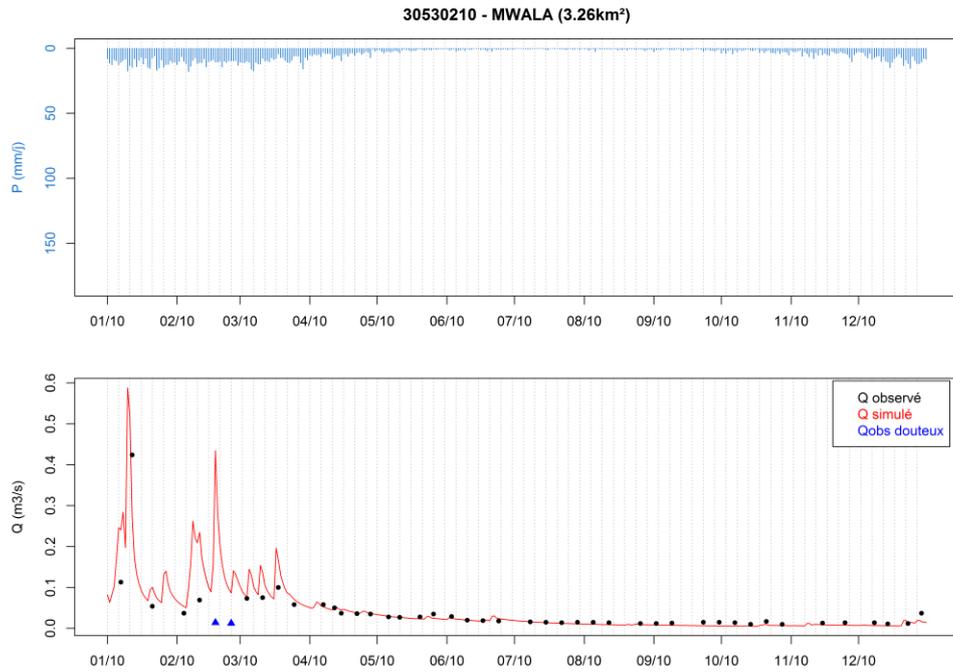


Figure 23. Débits simulés et observés de l'année 2010 pour le bassin de Mwala.

Pour d'autres bassins, les simulations de débits ne sont pas aussi performantes. C'est par exemple le cas des bassins d'Apandzo et de M'Ronabeja (Figure 24 et Figure 26). Sur les graphiques présentant la distribution des débits simulés et observés, une différence entre les deux distributions est observée. De plus, les graphiques représentant les débits observés en fonction des débits simulés montrent une différence marquée entre débits observés et simulés. De la même manière que précédemment, la Figure 25 et la Figure 27 donnent plus de détails sur une année de simulation pour les bassins d'Apandzo et de M'Ronabeja respectivement.

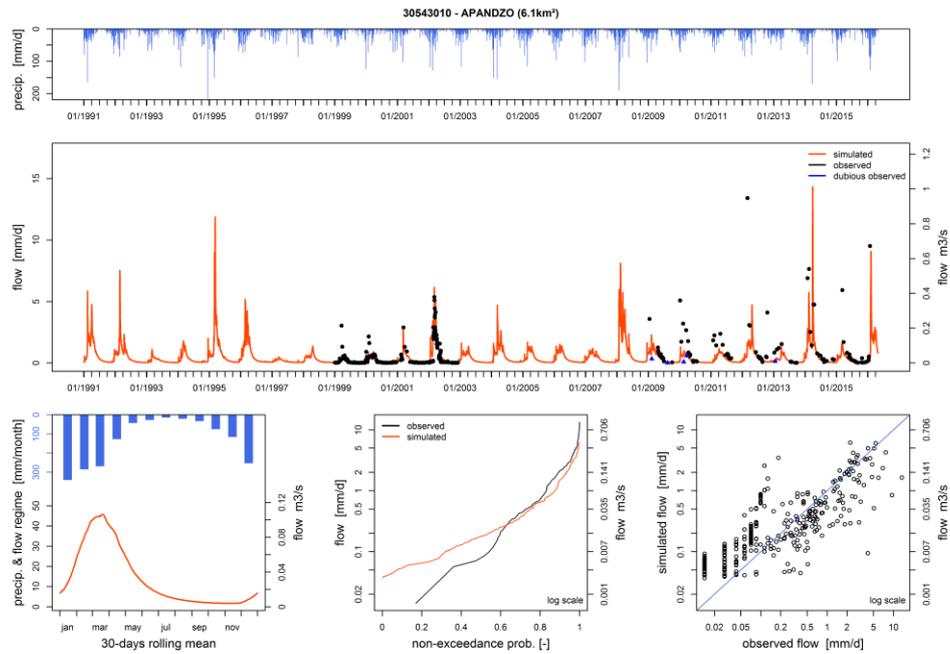


Figure 24. Résultat de la simulation de débit obtenue avec le modèle GR4J avec le module réservoir sur la période 1991-2016 pour le bassin d'Apandzo. En haut en bleu, l'historique des pluies ; au milieu, la chronique observée en point noir et simulée en trait rouge ; en bas à gauche, les régimes de pluie et de débit simulé ; en bas au milieu, les distributions des débits simulés en rouge et observés en noir ; en bas à droite, les débits simulés en fonction des débits observés.

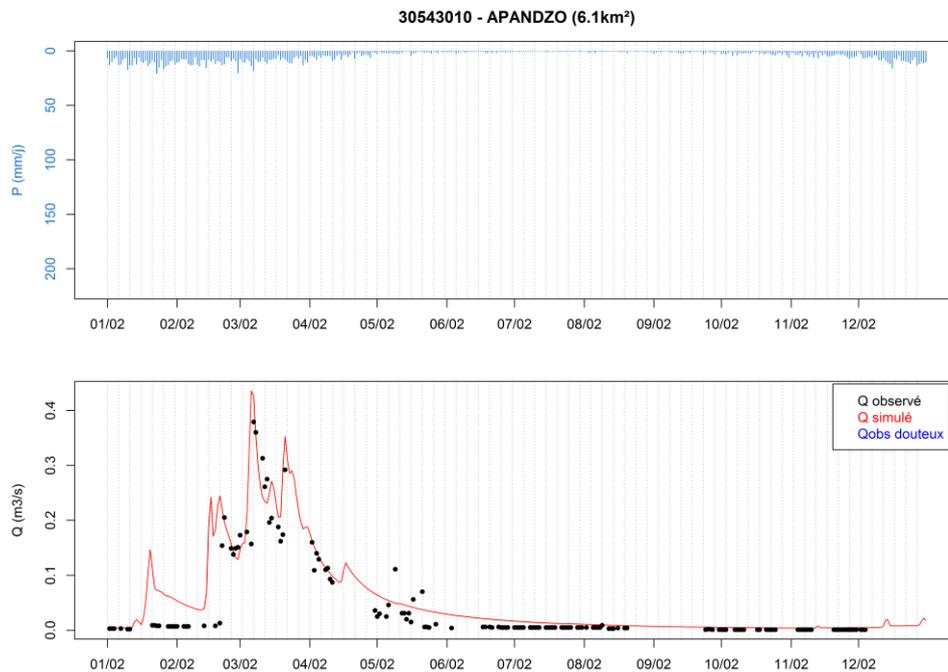


Figure 25. Débits simulés et observés de l'année 2002 pour le bassin d'Apandzo.

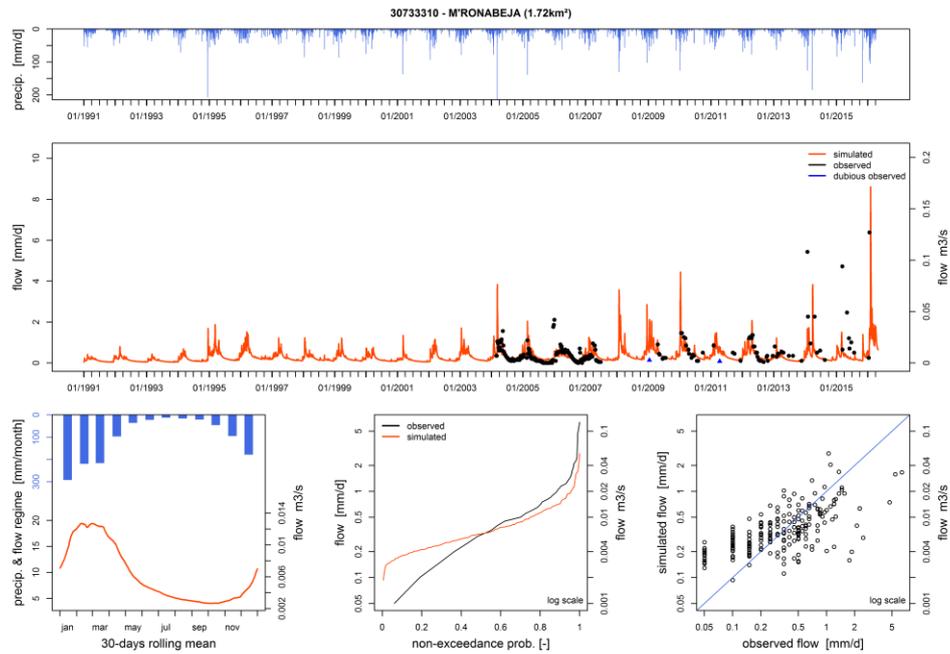


Figure 26. Résultat de la simulation de débit obtenue avec le modèle GR4J avec le module réservoir sur la période 1991-2016 pour le bassin de M’Ronabeja. En haut en bleu, l’histogramme des pluies ; au milieu, la chronique observée en point noir et simulée en trait rouge ; en bas à gauche, les régimes de pluie et de débit simulé ; en bas au milieu, les distributions des débits simulés en rouge et observés en noir ; en bas à droite, les débits simulés en fonction des débits observés.

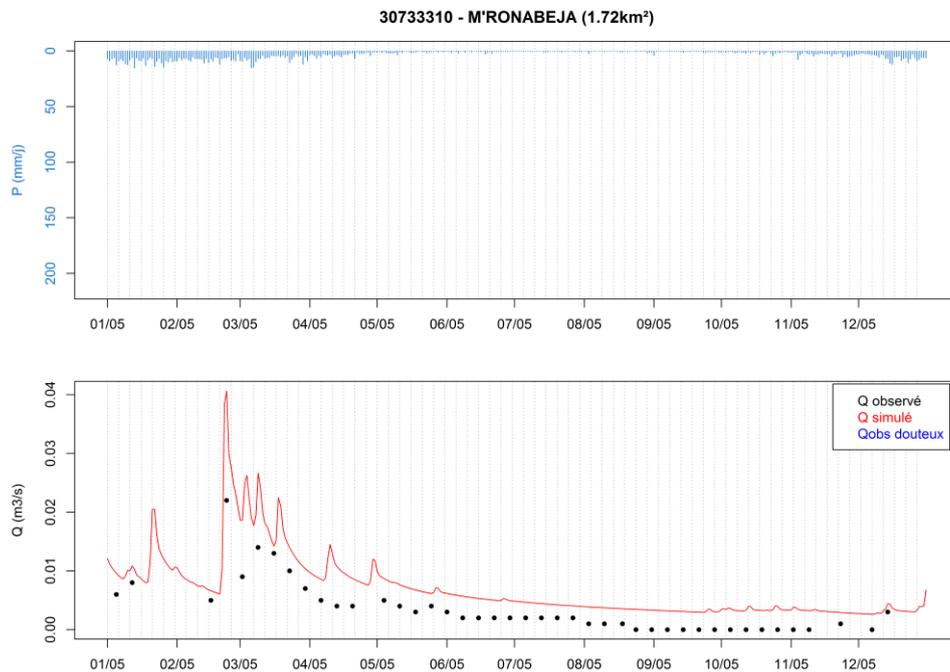


Figure 27. Débits simulés et observés de l’année 2005 pour le bassin de M’Ronabeja.

3.3.2 Cas particulier des bassins influencés par une retenue

Dans cette étude, quatre bassins sont influencés par les retenues de Dzoumogné et de Combani (Tableau 7). Dans ce rapport, nous allons nous intéresser plus particulièrement à deux cas plutôt extrêmes en termes de performances : le bassin de Dzoumogné retenue et le bassin d'Ourovéni pont.

Tout d'abord, les précédents résultats ont montré que la simulation de débit au niveau du bassin de Dzoumogné retenue présente de faibles performances, malgré l'utilisation du module réservoir avec le modèle GR4J.

La Figure 28 et la Figure 29 illustrent les chroniques de débits observés et simulés de ce bassin. Sur le graphique de la Figure 28 présentant la distribution des débits simulés et observés, une différence entre les deux distributions notamment au niveau des bas débits est observée. De plus, le graphique représentant les débits observés en fonction des débits simulés montrent bien un non-alignement des débits autour de la droite (1 :1). Enfin, les chroniques de débits de la Figure 29 illustrent également cette différence de débit entre observation et simulation, notamment en bas débit. Ces résultats sont donc en accord avec ceux précédemment présentés.

D'autre part, nous pouvons observer que les simulations de débit montrent une différence entre avant et après la mise en place de la retenue (mai 2001). Le manque de données de débit observées avant 2002 ne nous permet pas de vérifier si les simulations sont fiables sur la période 1991-2001.

Enfin, ce que l'on peut retenir pour le moment de ce bassin, c'est qu'au vu des erreurs importantes de simulation, on attribuerait à cette simulation de débit une confiance limitée, à prendre en compte lors de l'interprétation des seuils sécheresse.

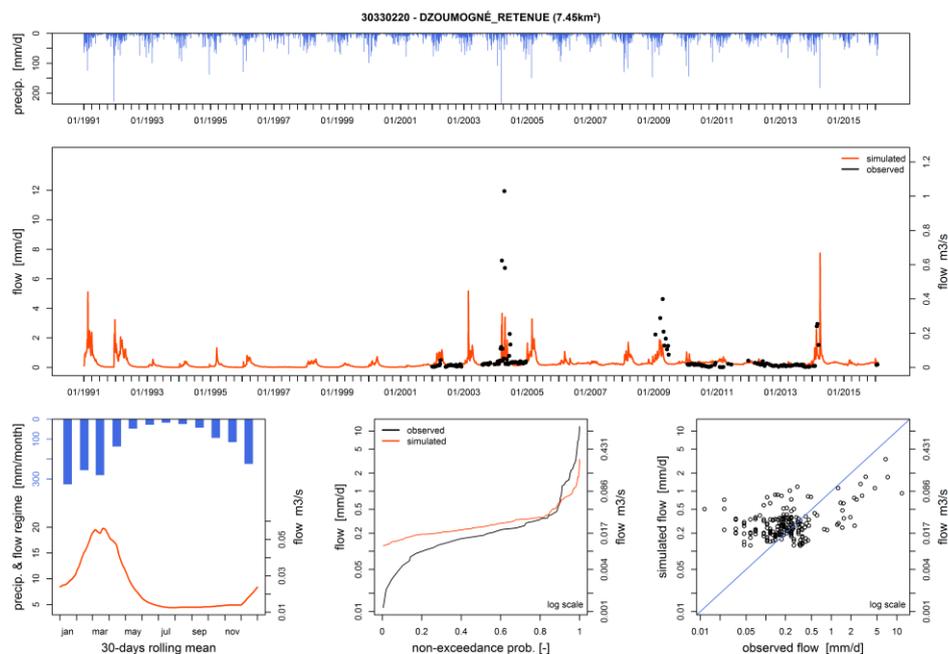


Figure 28. Résultat de la simulation de débit obtenue avec le modèle GR4J avec le module réservoir sur la période 1991-2016 pour le bassin de Dzoumogné retenue. En haut en bleu, l'historique des pluies ; au milieu, la chronique observée en point noir et simulée en trait rouge ; en bas à gauche, les régimes de pluie

et de débit simulé ; en bas au milieu, les distributions des débits simulés en rouge et observés en noir ; en bas à droite, les débits simulés en fonction des débits observés.

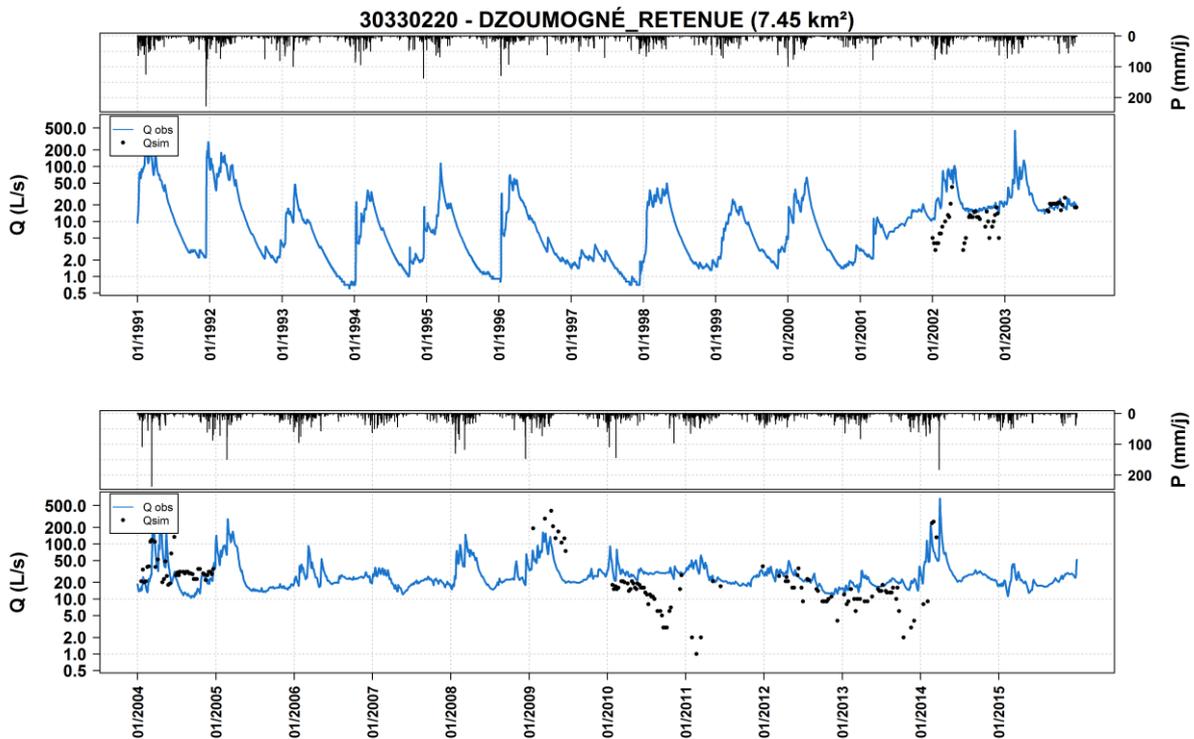


Figure 29. Chronique des débits observés en point noir et simulés en trait bleu pour le bassin de Dzoumogné retenue.

Concernant le bassin versant d'Ourovéni pont, les précédents résultats ont montré de bonnes performances concernant la simulation de débit par le modèle GR4J. De la même manière que pour Doumogné retenue, la Figure 30 et la Figure 31 illustrent les chroniques de débits observés et simulés de ce bassin. On peut observer sur le graphique de la Figure 30 présentant les distributions de débits observés et simulés plutôt semblables, une différence un peu plus marquée au niveau des très faibles débits. Le graphique présentant les débits observés en fonction des débits simulés montre des différences limitées entre observation et simulation (mais toujours plus marquées pour les bas débits). Notons que ces résultats sont en accord avec ceux de la Figure 32 qui présentait aussi pour ce bassin un écart relatif plus important dans le cas où il était calculé sur les bas débits.

Enfin, sur la chronique de la Figure 31, on observe également que les écarts de débit entre observation et simulation ont lieu lors de l'estimation de bas débits. L'erreur sur l'estimation des autres débits est quant à elle plus limitée. On retrouve également bien le changement de comportement du débit entre la période avant et après la mise en place de la retenue (janvier 1998), mais ne disposant pas de données de débit avant 1998, nous ne pouvons évaluer la simulation avant cette période.

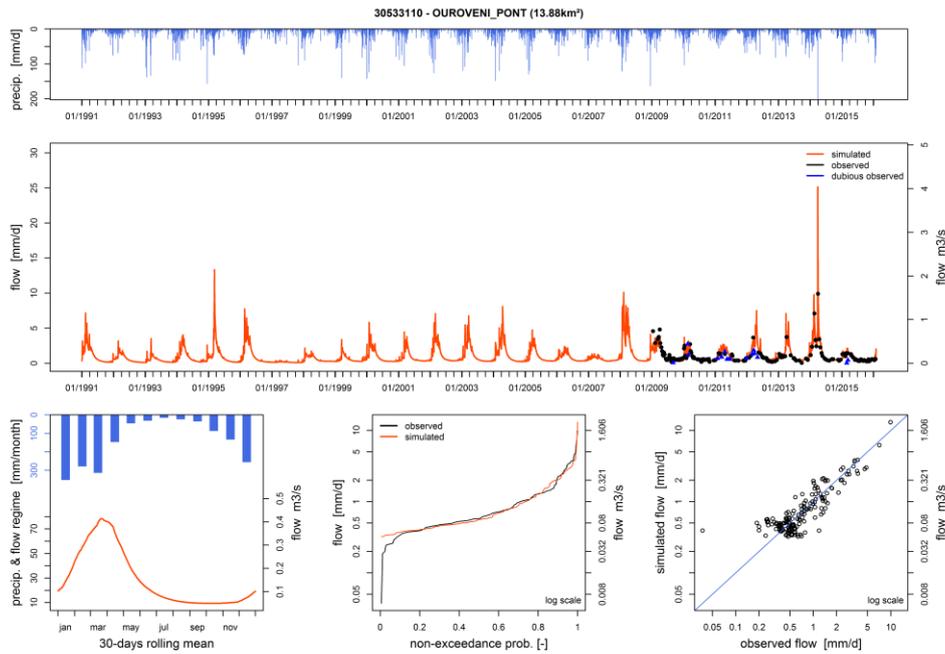


Figure 30. Résultat de la simulation de débit obtenue avec le modèle GR4J avec le module réservoir sur la période 1991-2016 pour le bassin d'Ourovéni pont. En haut en bleu, l'histogramme des pluies ; au milieu, la chronique observée en point noir et simulée en trait rouge ; en bas à gauche, les régimes de pluie et de débit simulé ; en bas au milieu, les distributions des débits simulés en rouge et observés en noir ; en bas à droite, les débits simulés en fonction des débits observés.

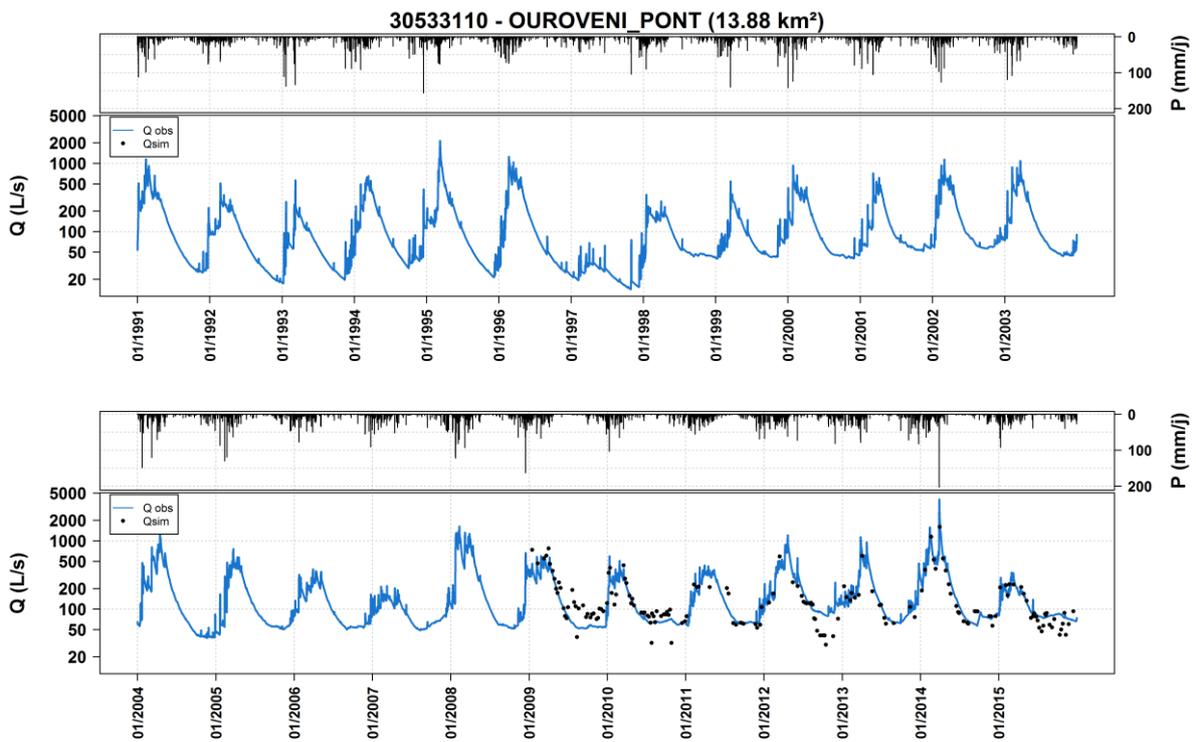


Figure 31. Chronique des débits observés en point noir et simulés en trait bleu pour le bassin de d'Ourovéni pont.

3.3.3 Comparaison quantitative entre les débits simulés et observés

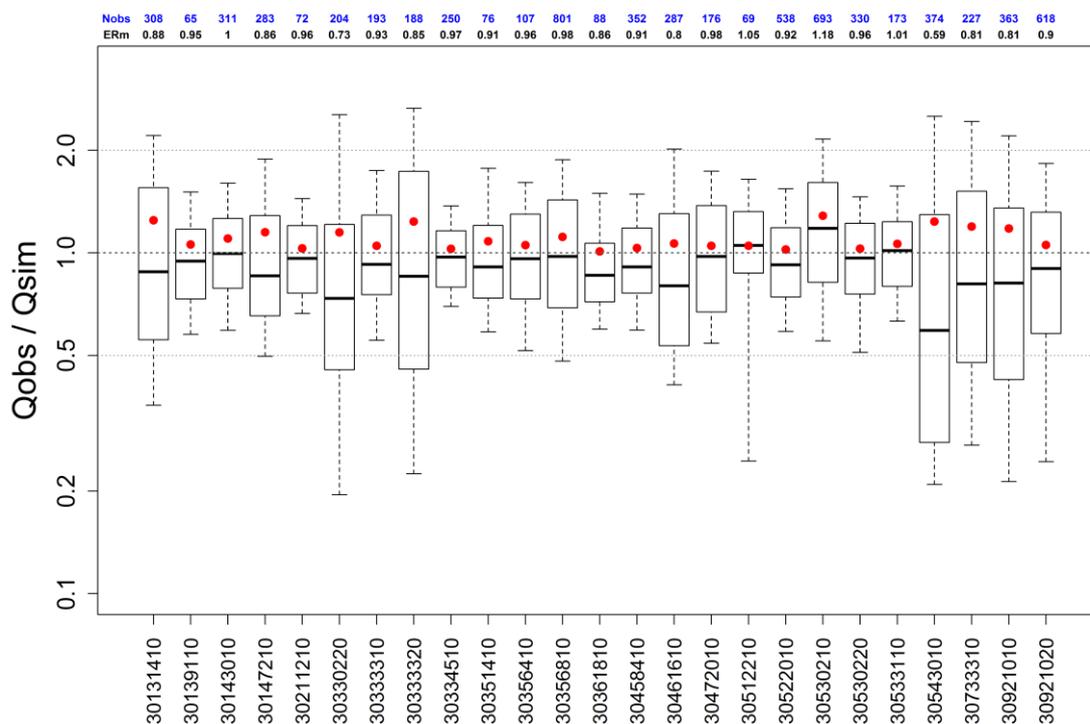
La Figure 32 présente les distributions de l'écart relatif (rapport entre débit observé et débit simulé) par bassin versant lorsqu'il est calculé sur toute la période de simulation (Figure 32a) et lorsqu'il est calculé uniquement sur les bas débits (débits inférieurs au débit simulé médian) (Figure 32b). Ces graphiques montrent dans les deux cas que les distributions des écarts relatifs au sein d'un même bassin et entre les bassins sont variables. Les valeurs moyennes de ces écarts relatifs varient entre 0,91 et 1,55 selon les bassins, avec une majorité de bassins entre 1 et 1,20. De plus, dans la plupart des cas, les débits ont tendance à être surestimés par le modèle (médiane des boxplots en dessous de 1).

De manière générale, les bassins présentant les écarts relatifs les plus importants sur la période 1991-2016 ont également des biais forts sur les bas débits :

- 30330220 (Dzoumogné retenue)
- 30333320 (Dzoumogné Ouest)
- 30543010 (Apandzo)
- 30733310 (M'Ronabeja)
- 30921010 (Dembeni haut)
- 30921020 (Dembeni bas)

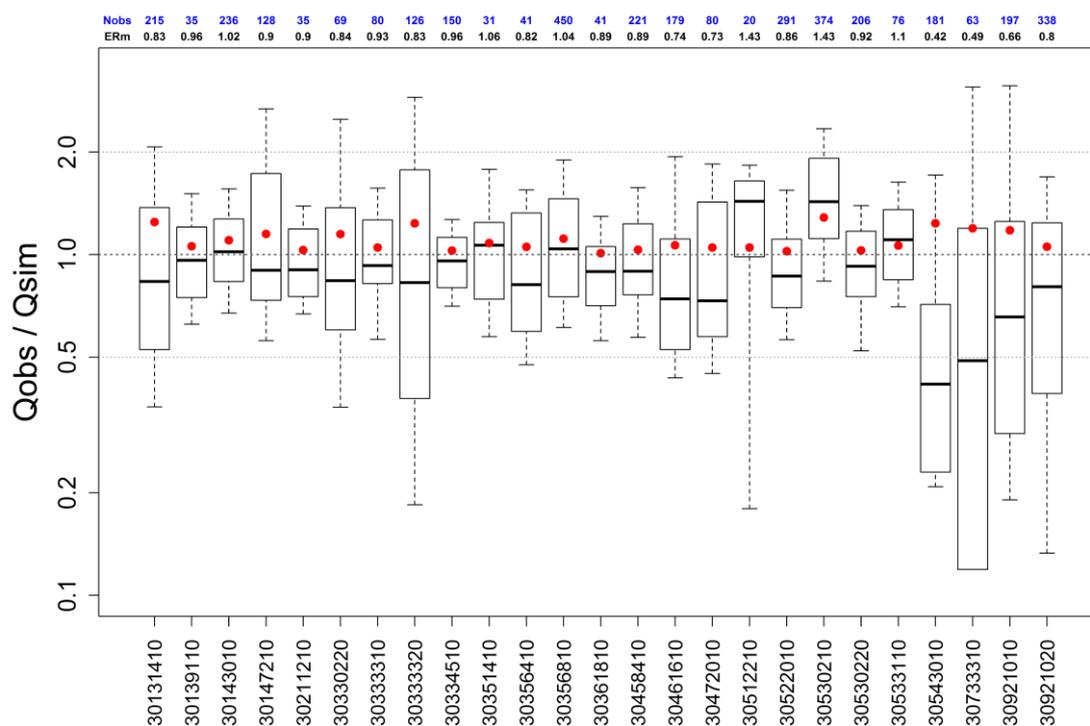
Les bassins ayant de faibles écarts relatifs présentent également les mêmes tendances dans les deux cas tels que les bassins 30533110 (Ourovéni pont), 30211210 (M'Gombani), 30334510 (Mohogoni) ou 30361810 (Longoni) par exemple.

Ecart relatif calculé sur la période 1991-2016



a)

Ecart relatif calculé sur les débits inférieurs au Qsimulé médian



b)

Figure 32. Distribution du biais (débit observé/débit simulé lorsque le débit observé est disponible) pour chaque bassin versant. En point rouge, la moyenne du biais pour chaque bassin versant, en haut du graphique en noir, la valeur médiane du biais et en bleu le nombre d'écart relatifs dans chaque boîte à moustache. Graphique a : biais calculé sur la période 1991-2016 ; Graphique b : biais calculé sur les débits

inférieurs au débit simulé médian. Les boîtes à moustaches montrent les quantiles 10, 25, 50, 75 et 90 de la distribution, du bas vers le haut.

Le Tableau 9 présente l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les débits observés et simulés pour chaque bassin versant et pour deux cas différents (RMSE calculé sur tous les débits de la période 1991-2016 et RMSE calculé uniquement sur les bas débits). Cette erreur étant non adimensionnelle comme l'écart relatif, il est difficile de comparer les bassins versants entre eux. Ce critère nous permet par contre d'avoir une idée de l'erreur quadratique moyenne entre les débits observés et simulés.

Tableau 9. Erreur quadratique moyenne (RMSE) pour chaque bassin versant calculée sur la période 1991-2016 et calculée sur les débits inférieurs au débit simulé médian.

Code Hydro	Nom de la station	RMSE [m ³ /s]	RMSE bas débits [m ³ /s]
30131410	GOULOUÉ	0,0294	0,0067
30139110	PASSAMAINTY	0,0684	0,0189
30143010	KWALÉ_HAUT	0,0322	0,0040
30147210	KWALÉ_STATION	0,1513	0,0182
30211210	M'GOMBANI	0,0111	0,0048
30330220	DZOUMOGNÉ_RETENUE	0,0880	0,0101
30333310	MAPOUÉRA	0,0422	0,0125
30333320	DZOUMOGNÉ_OUEST	0,0336	0,0114
30334510	MOHOGONI	0,0202	0,0104
30351410	BOUYOUNI_HAUT	0,0485	0,0197
30356410	BOUYOUNI_BAS	0,0544	0,0354
30356810	MERESSE	0,1001	0,0082
30361810	LONGONI	0,0301	0,0105
30458410	BOUNGOUMOUHÉ	0,0075	0,0042
30461610	BANDRAZIA	0,0066	0,0023
30472010	BATRINI	0,0135	0,0109
30512210	SOULOU	0,0120	0,0101
30522010	M'ROALÉ	0,0261	0,0115
30530210	MWALA	0,4139	0,0090
30530220	OUROVENI_STATION	0,1041	0,0398
30533110	OUROVENI_PONT	0,0704	0,0291
30543010	APANDZO	0,0753	0,0221
30733310	M'RONABEJA	0,0124	0,0069
30921010	DEMBENI_HAUT	0,0474	0,0132
30921020	DEMBENI_BAS	0,0911	0,0280

3.4 Sensibilité du modèle aux données d'ETP

Au cours de cette étude, deux évapotranspirations potentielles (ETP) ont pu être testées (pour plus de détails, voir la section 2.4) :

- ETP de Penman issue de la Publithèque de Météo France
- ETP d'Oudin calculée à partir des données de température issues de la Publithèque de Météo France

La Figure 33 compare les performances du modèle hydrologique pour chaque bassin versant lorsque les ETP de Penman et d'Oudin sont utilisés en entrée du modèle. Dans l'ensemble, on observe de faibles différences de performances du modèle entre l'utilisation des deux ETP. L'utilisation de l'ETP de Penman semble fournir tout de même de meilleures performances pour la majorité des stations. Toutefois, pour les bassins de Passamainty, de Dzoumogné retenue et de Soulou, de meilleures performances sont obtenues avec l'utilisation de l'ETP d'Oudin.

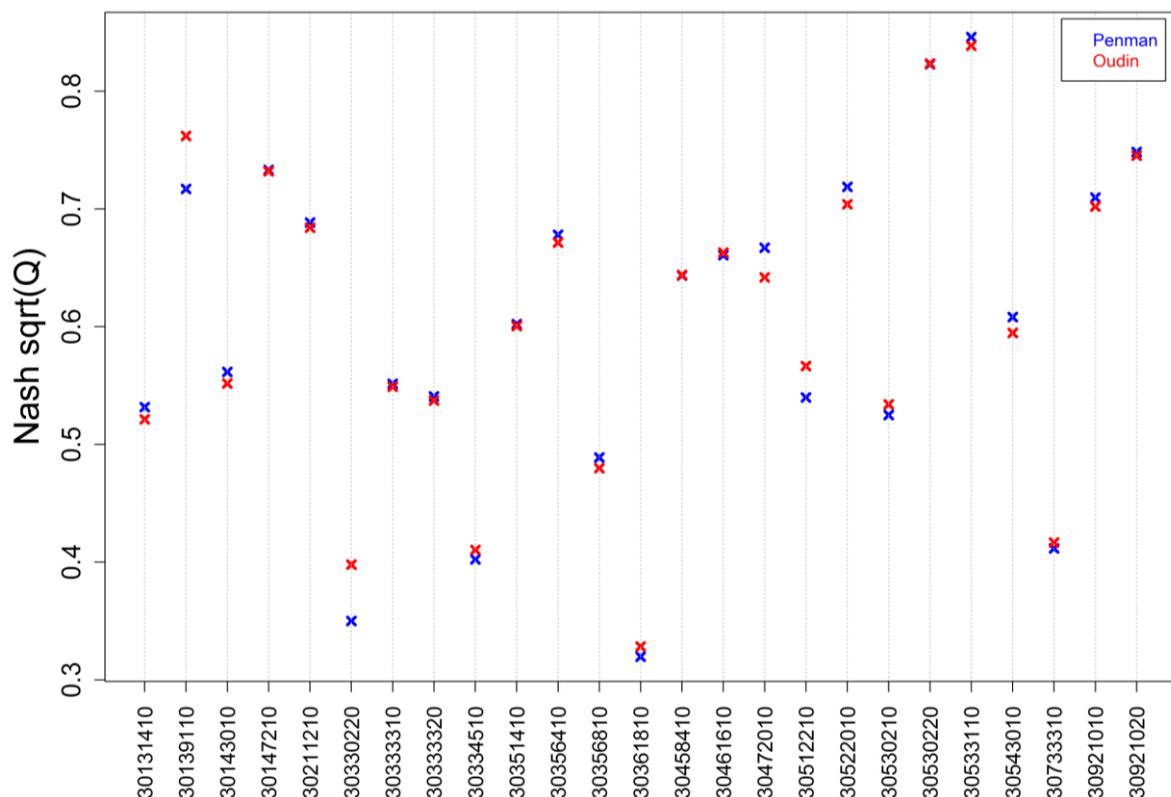


Figure 33. Performances du modèle hydrologique obtenues avec les données d'ETP de Penman en bleu et les données d'ETP d'Oudin en rouge, pour chaque bassin versant.

La Figure 34 compare les chroniques de débits simulés obtenues avec l'ETP de Penman et l'ETP d'Oudin pour quatre bassins versants. On peut observer dans un premier temps que les différences de simulation lorsque celles-ci sont obtenues avec différentes ETP sont très peu marquées. Les résultats de simulation obtenus avec l'ETP de Penman et l'ETP d'Oudin sont en général semblables, mais des différences plus marquées peuvent être observées comme pour les bassins de Mohogoni et Passamainty par exemple.

Pour la suite de l'étude, nous avons donc décidé d'utiliser l'ETP de Penman, comme recommandé par Météo France et déjà utilisée dans de précédents travaux (par exemple, la thèse de Lapègue [1999]).

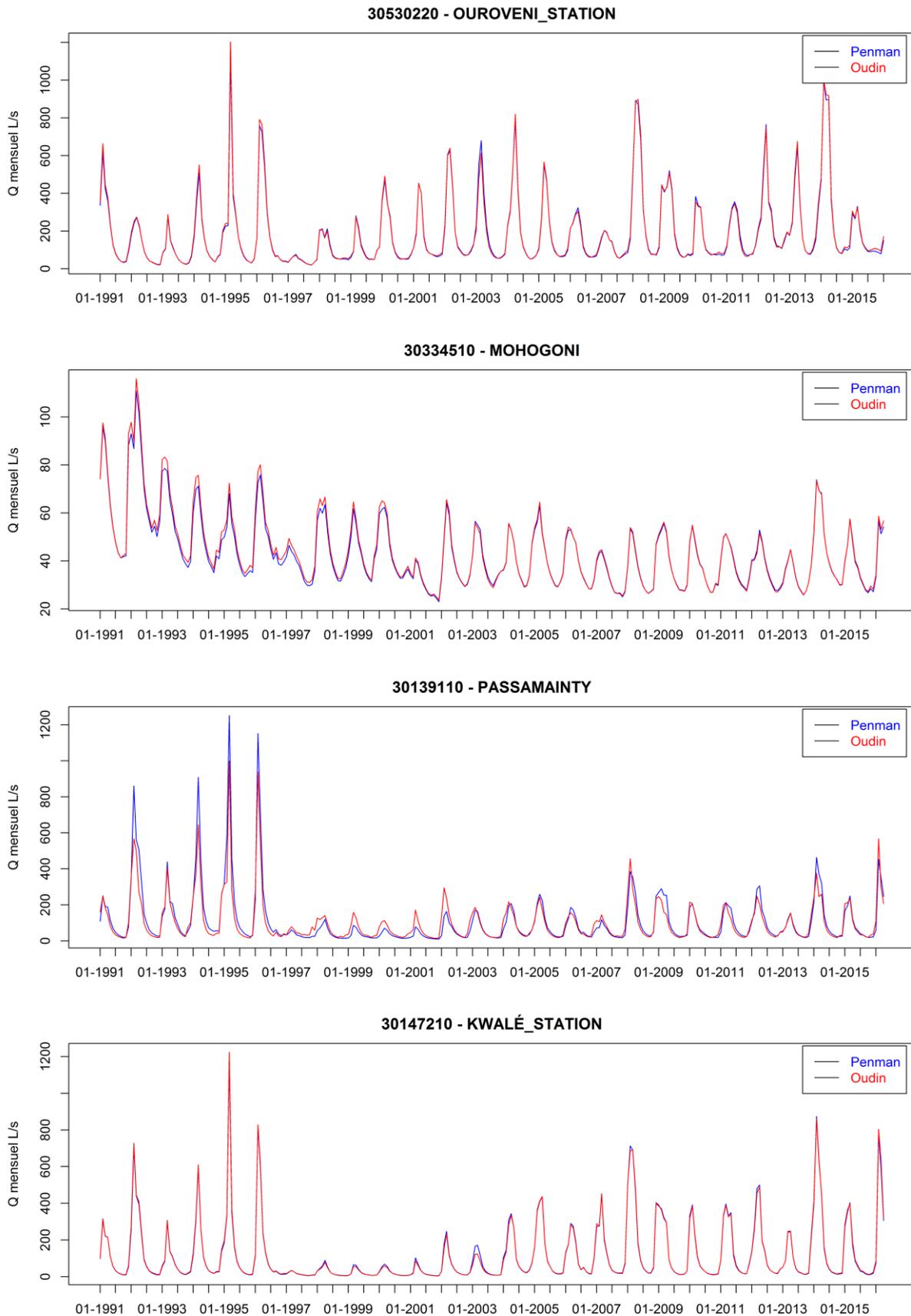


Figure 34. Chroniques de débits simulés de quatre bassins versants obtenues avec différentes ETP : ETP de Penman en bleu et ETP d'Oudin en rouge.

3.5 Conclusion sur la modélisation hydrologique

Les simulations hydrologiques des 25 bassins versants de l'étude sont assez hétérogènes entre les bassins. Les débits de certains bassins sont plutôt bien modélisés par le modèle et d'autres un peu moins, notamment pour l'estimation des bas débits.

Notons également, que dans certains cas les faibles débits mesurés de l'ordre du L/s forment des « paliers » dans la chronique de débit observé (voir l'exemple de la Figure 35) alors que les débits simulés ayant davantage de chiffres significatifs auront tendance à avoir une chronique beaucoup plus « lissée ». Ceci peut probablement expliquer en partie la différence numérique entre les débits mesurés et observés.

Ainsi, lors de l'interprétation des seuils sécheresse, il sera important de prendre également en compte l'évaluation de la qualité des simulations du modèle hydrologique, afin d'évaluer au mieux la fiabilité de l'estimation de ces seuils.

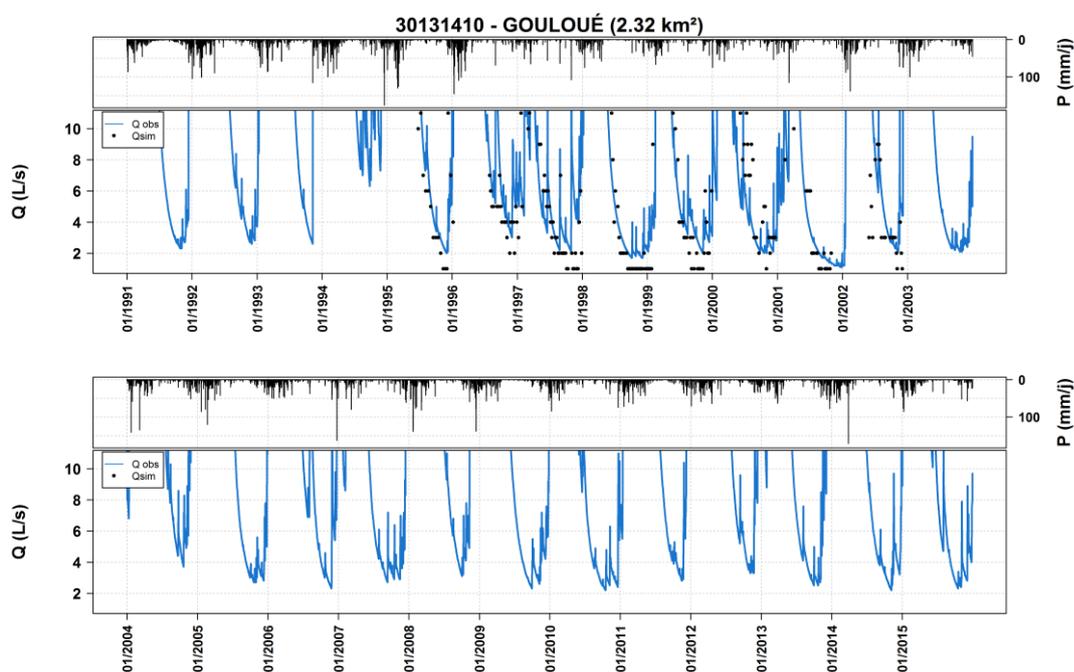


Figure 35. Chronique des débits observés en point noir et simulés en trait bleu pour le bassin de Gouloué.

4 Détermination des seuils sécheresse

4.1 Cadre réglementaire

Il est nécessaire de comprendre dans quel cadre doivent s'inscrire l'établissement de seuils pour la gestion opérationnelle de la ressource. Il existe pour cela le Guide méthodologique des mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse (DGALN, 2005).

Le guide préconise des dispositifs de trois ou quatre niveaux maximum :

- Un premier seuil de vigilance peut être défini afin de servir de référence pour déclencher des mesures de communication et de sensibilisation du grand public et des professionnels, dès que la tendance hydrologique montre un risque de crise à court ou moyen terme, donc éventuellement dès la fin de l'hiver.
- Le niveau d'alerte peut être défini par le débit ou la cote piézométrique au-dessus duquel sont assurés la coexistence de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique. Ce premier seuil doit en conséquence pouvoir être garanti statistiquement au moins 8 années sur 10. Il est recherché par le plafonnement des prélèvements en amont des points de référence et par l'exploitation des ressources de soutien d'étiage existantes, notamment dans les zones déficitaires. Lors du dépassement de ce seuil, les premières mesures de limitation des usages de l'eau doivent être mises en place.
- Un premier niveau de crise pourra être mis en œuvre. Il doit permettre une limitation progressive des prélèvements et le renforcement substantiel des mesures de limitation ou de suspension des usages en cas de besoin afin de ne pas atteindre le niveau de crise renforcé.
- Le dernier niveau ou niveau de crise renforcé doit correspondre à la valeur en-dessous de laquelle sont mis en péril l'alimentation en eau potable et la survie des espèces présentes dans le milieu. Il doit en conséquence impérativement être sauvegardé par toutes mesures préalables, notamment la suspension de certains usages de l'eau.

Les critères de déclenchement des mesures ne sont pas clairement explicités mais l'exemple du VCN3 (débit moyen minimal annuel sur 3 jours consécutifs) est fourni comme variable de comparaison aux seuils. Le réseau et les valeurs peuvent correspondre à ceux définis dans les SDAGE ou SAGE s'ils existent.

Nous comprenons ici la nécessité de définir des seuils qui permettent une gestion raisonnée de l'utilisation de la ressource :

- les seuils doivent être suffisamment différents pour ne pas être franchis d'un bulletin de situation hydrologique à l'autre (on pourra en ce cas limiter le nombre de seuils à 3 comme indiqué par le guide et repris dans l'arrêté cadre sécheresse du bassin Seine Normandie)
- les seuils doivent être définis pour permettre d'éviter des situations de pénurie et permettre le maintien de la vie des populations aquatiques et l'alimentation en eau potable des populations en priorité (si les seuils définis sont inférieurs au débit minimum biologique ou au débit d'alimentation prélevable, ils devraient être substitués par le plus élevé parmi les deux).

Du fait des relations étroites entre nappes souterraines et cours d'eau, un certain nombre d'arrêtés cadre sécheresse en France préconisent des mesures applicables à la fois aux eaux souterraines et de surface. Il apparaît nécessaire que les seuils piézométriques et de débit soient cohérents puisque le franchissement d'un seuil, piézométrique ou de débit, déclenchera les mesures de limitation à la fois sur la zone concernée par la nappe et le cours d'eau.

La circulaire du 18 mai 2011 relative aux mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse indique « un objectif de tendre vers des seuils homogènes et en nombre limité sur le territoire national. » De plus, « les niveaux de restriction doivent être cohérents avec la terminologie utilisée dans les SDAGE pour la définition des objectifs quantitatifs d'étiage. » Dans le SDAGE Mayotte, cette terminologie est inexistante à notre connaissance. La

circulaire préconise dans ce cas trois niveaux de restriction avec la terminologie suivante : un seuil d’**alerte**, un seuil d’**alerte renforcée** et un seuil de **crise**, plus éventuellement un quatrième seuil de **vigilance** (exemple sur la Figure 36).

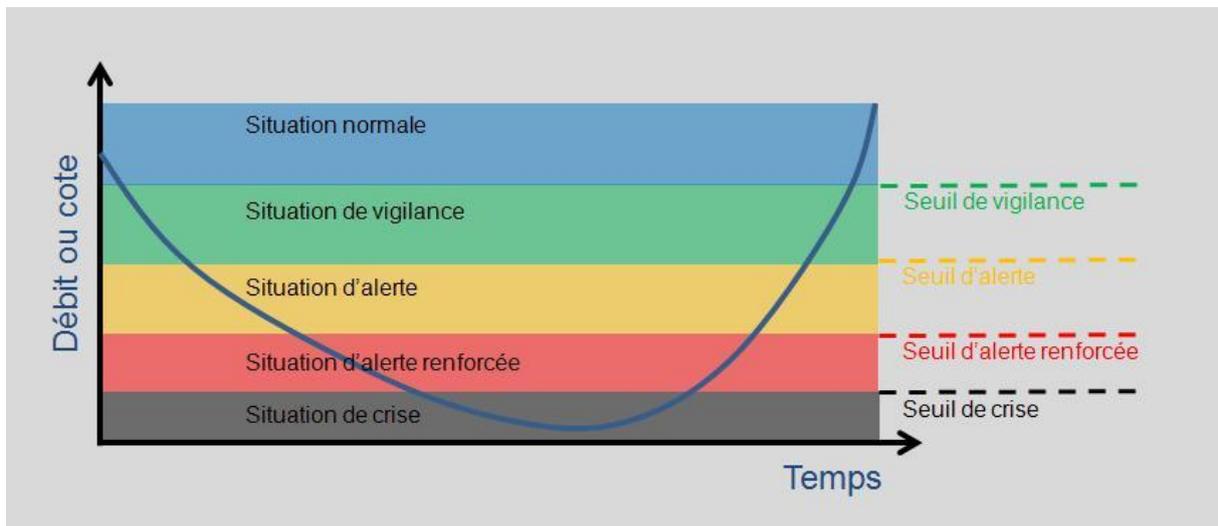


Figure 36 : Illustration des seuils hydrométriques ou piézométriques

Certains usages sont soumis à une réglementation particulière en termes de restriction pour respecter les débits réservés ; les seuils sécheresse devront être comparés aux seuils de cette réglementation. En effet, l’article L214-18 du code de l’environnement stipule que tout ouvrage dans le lit d’un cours d’eau (barrage pour permettre un prélèvement d’eau par exemple) doit comporter des dispositifs maintenant dans ce lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces ; dans le cas général, ce débit minimal ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d’eau ; il doit être égal au débit à l’amont immédiat de l’ouvrage, si celui-ci est inférieur au dixième du module (donc pas de prélèvement possible en dessous de ce seuil).

Il y a également volonté d’une cohérence de la gestion des situations de crise sur le territoire d’où la nécessité d’homogénéiser les seuils de débit et la manière de les définir, même si ceux-ci pourront être ajustés en fonction des spécificités locales (caractéristiques physiques, usages). La circulaire définit pour cela un zonage d’alerte comme unité hydrographique cohérente pour prescrire des mesures de restriction.

4.2 Méthodologie pour la détermination des seuils hydrométriques

Nous proposons dans cette étude de repartir des travaux réalisés à la Réunion (Nicolle et al., 2014) pour proposer des valeurs de seuils cohérentes sur Mayotte :

- Etablissement de trois niveaux de sécheresse, avec possibilité d’ajouter un quatrième seuil de vigilance ;
- Seuils de débits basés sur le VCN3 (minimum annuel des débits moyens sur 3 jours) pour des périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans pour les différents niveaux de sécheresse (respectivement vigilance, alerte, alerte renforcée et crise). Les périodes de retour pourront être ajustées en fonction des résultats et des spécificités des bassins (seuils trop ou pas assez restrictifs par rapport aux usages) ;

- Ces seuils devront faire l'objet d'une validation pour vérifier la cohérence entre seuils et usages, en fonction des données disponibles sur Mayotte. En l'absence de valeur du débit minimum biologique, la circulaire du 5 juillet 2011 relative à l'application de l'article L. 214-18 du code de l'environnement sur les débits réservés à maintenir en cours d'eau indique que le minimum biologique ne saurait être inférieur au 1/10e du module (1/20e pour les modules supérieurs à 80 m3/s). Il serait intéressant de comparer cette valeur aux seuils déterminés.
- La variable de comparaison pour l'application des mesures choisie pour une étude similaire à la Réunion est le VCN3 calculé sur 10 jours consécutifs. Le pas de temps de 10 jours est compatible avec la réunion du comité de sécheresse tous les 15 jours en cas de crise. A Mayotte, le faible nombre de stations équipées de dispositif de mesures en continu du débit nous amènera à comparer dans cette étude les seuils au débit moyen journalier.
- Nous vérifierons que les modalités de déclenchement des mesures sont cohérentes avec une gestion opérationnelle : fréquence de déclenchement des mesures (nombre de jours sous les seuils), changements du mode de gestion (passage d'un niveau de restriction à un autre)...

4.3 Débits minimum biologiques

ASCONIT a réalisé une étude pour définir les débits minimum biologiques (DMB) sur certains cours d'eau Mahorais (*Définition des débits de référence « biologiques » (DMB) pour les rivières de Mayotte : application de la méthode des micro-habitats*, ASCONIT, 2009). Le Tableau 10 récapitule les valeurs de DMB déterminées (fourchettes basses et hautes) sur les tronçons des cinq cours d'eau étudiés. ASCONIT insiste sur le caractère exploratoire de l'étude, et sur les précautions à prendre quant à la validation de ces débits minimum biologiques.

Tableau 10 : Valeurs hautes et basses des débits minimums biologiques déterminés par ASCONIT

Tronçon	Surface (km ²)	DMBb (L/s)	DMBh (L/s)
Boungoumouhé	1,75	6,5	8,5
Bouyouni	8,58	NA	NA
Dembéni	7,28	7,5	9,5
Dzoumogné	3,00	6,5	9,5
Kwalé	12,00	5,5	10,5

Par ailleurs, ces DMB ne correspondent pas à la valeur des DMB au droit des stations étudiées. Il est néanmoins possible d'en fournir une estimation via le débit spécifique (méthode utilisée par ASCONIT pour déterminer les débits au niveau des tronçons) :

$$DMB_{station} = \frac{DMB_{ASCONIT}}{Surface_{amont_ASCONIT}} \times Surface_{amont_station}$$

où $DMB_{station}$ est le DMB (L/s) estimé à la station hydrométrique, $Surface_{amont_station}$ la surface (km²) drainée par la station, $DMB_{ASCONIT}$ le DMB (L/s) estimé par ASCONIT sur le tronçon de rivière, et $Surface_{amont_ASCONIT}$ la surface (km²) drainée par le tronçon de rivière. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Valeurs hautes et basses des débits minimums biologiques aux stations

Code Hydro	Station	Surface (km ²)	Surface ASCONIT	DMBb ASCONIT	DMBh ASCONIT	DMBb (L/s)	DMBh (L/s)
------------	---------	----------------------------	-----------------	--------------	--------------	------------	------------

			(km ²)	(L/s)	(L/s)		
30458410	Boungoumouhé	2,06	1,75	6,5	8,5	7,7	10,0
30356410	Bouyouni Bas	8,61	8,58	NA	NA	NA	NA
30351410	Bouyouni Haut	5,36	8,58	NA	NA	NA	NA
30921020	Dembéni Bas	11,89	7,28	7,5	9,5	12,2	15,5
30921010	Dembéni Haut	5,08	7,28	7,5	9,5	0,0	0,0
30333320	Dzoumogné Ouest	15,25	3,00	6,5	9,5	33,0	48,3
30330220	Dzoumogné Retenue	7,45	3,00	6,5	9,5	16,1	23,6
30143010	Kwalé Haut	4,03	12,00	5,5	10,5	1,8	3,5
30147210	Kwalé Station	12,07	12,00	5,5	10,5	5,5	10,6

4.4 Détermination des seuils hydrométriques

Pour la détermination des seuils hydrométrique, nous avons choisi de conserver les simulations réalisées à l'aide de la formule d'ETP de Penman.

4.4.1 Calcul des VCN3 (débit moyen minimal annuel sur 3 jours consécutifs)

Les VCN3 sont déterminés sur l'année hydrologique, ceci pour éviter de retenir des VCN3 qui correspondent à une même période d'étiage sur deux années civiles différentes. A Mayotte et plus particulièrement pour les stations de l'étude, l'année hydrologique commence en mars de l'année (cf. régimes hydrologiques, moyennes mensuelles interannuelles, sur la Figure 37), qui correspond à la période de hautes eaux. Ainsi, il est quasiment assuré de ne pas couper en deux une même période d'étiage. On remarque que les débits mensuels moyens calculés à partir des simulations de débit présentent des différences prononcées avec les débits mensuels moyens observés en période de hautes eaux (janvier à avril/mai). Le faible nombre d'observations en période de hautes eaux associé à la dynamique rapide des crues ne permet pas d'obtenir une bonne estimation du débit moyen mensuel. La modélisation, même imparfaite, permet de fournir des estimations peut-être plus réalistes des volumes qui transitent en hautes eaux. A l'inverse, les débits mensuels moyens observés et simulés en période de basses eaux (juin/juillet à novembre/décembre) sont beaucoup plus proches. Les observations plus nombreuses en période de basses eaux et la dynamique lente des étiages donnent une idée plus précise du débit qui transite réellement pendant les périodes de basses eaux, d'où les plus faibles différences avec les débits modélisés. Ceci n'est pas valable sur tous les bassins et peut dépendre du faible nombre de mesures sur certaines chroniques observées (qui peut induire des problèmes de calage ou des différences d'échantillonnage, si les observations sont concentrées sur des années particulièrement sèches ou humides).

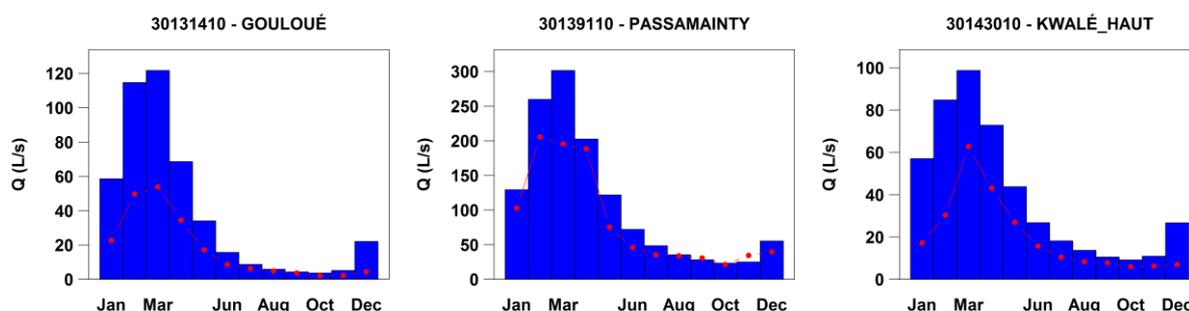


Figure 37 : Régimes mensuels de débits simulés (histogrammes bleus) et calculés à partir des données observées (rouge) sur trois stations

La Figure 38 présente les périodes de l'année auxquelles se produisent les VCN3 pour l'ensemble des stations (les résultats station par station sont présentés en Annexe 2). Globalement, l'ensemble des VCN3 apparaissent sur la période de septembre à février, avec plus de 85% sur la période octobre-décembre.

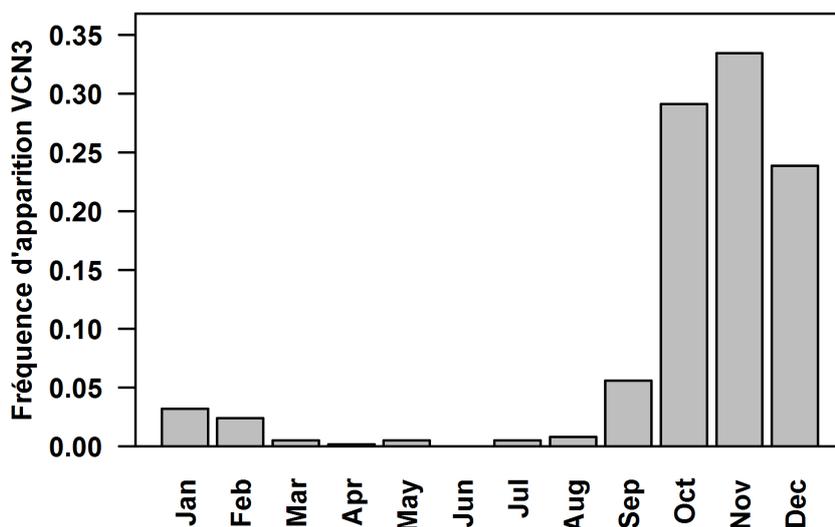


Figure 38 : Fréquences d'apparition par mois des VCN3 tous bassins versants confondus (déterminées à partir des simulations de débit)

Les VCN3 qui apparaissent en dehors de la période de septembre à février correspondent aux stations influencées par les retenues (Dzoumogné retenue, Dzoumogné ouest par la retenue de Dzoumogné, Oourovéni pont et Oourovéni station par la retenue de Combani). En effet, le débit étant très régulé par les retenues, les périodes de basses eaux sont soutenues et moins identifiables après la construction des retenues (1998 pour Combani et 2002 pour Dzoumogné), ceci est particulièrement visible sur la Figure 39, où les VCN3 après construction des retenues sont plus élevés. Les VCN3 associés aux périodes de retour sur ces stations devront être déterminés sur des débits « naturels », c'est-à-dire antérieurs à la construction des retenues.

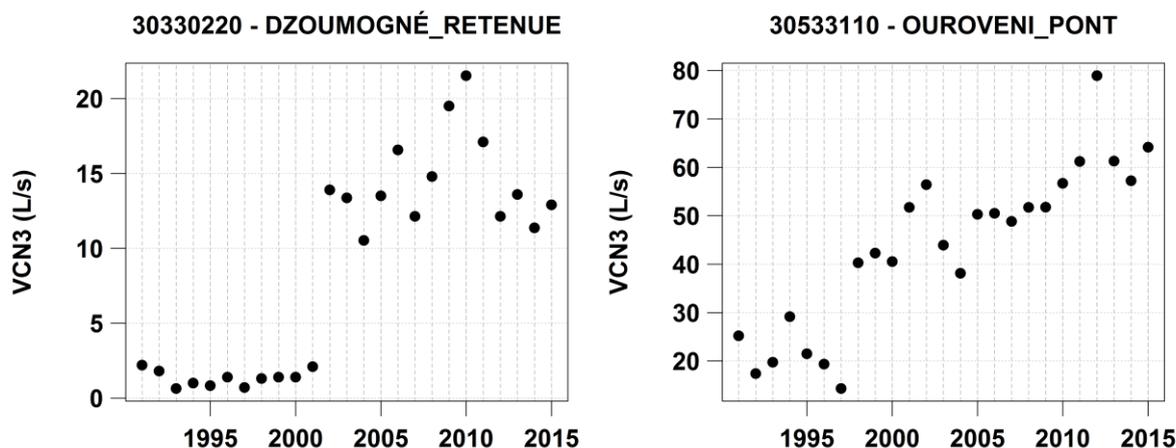


Figure 39 : VCN3 pour chaque année sur deux stations influencées par les retenues collinaires (Dzoumogné retenue et Ourovéni Pont)

La Figure 40 présente la distribution sur tous les bassins et pour chaque année des VCN3 normalisés par le VCN3 moyen (moyenne sur chaque bassin des VCN3 de toutes les années). Ceci permet d’observer la sévérité des étiages pour chaque année sur l’ensemble des stations, une valeur inférieure à 1 présente des étiages plus sévère que la moyenne. On observe bien les années d’étiages plus sévères (particulièrement les années 1997 à 2001, mais aussi 2006, 2010 et 2015) et les années d’étiages moins soutenus (1996, 2004, 2008, 2012 par exemple). D’autres années sont plus difficiles à qualifier, avec des années d’étiages plus sévères sur certaines stations et moins sévères sur les autres (1992, 1995, 2003, 2007 par exemple). Ceci est plus particulièrement visible sur la Figure 41 qui présente les cartes pour chaque année de ces VCN3 normalisés.

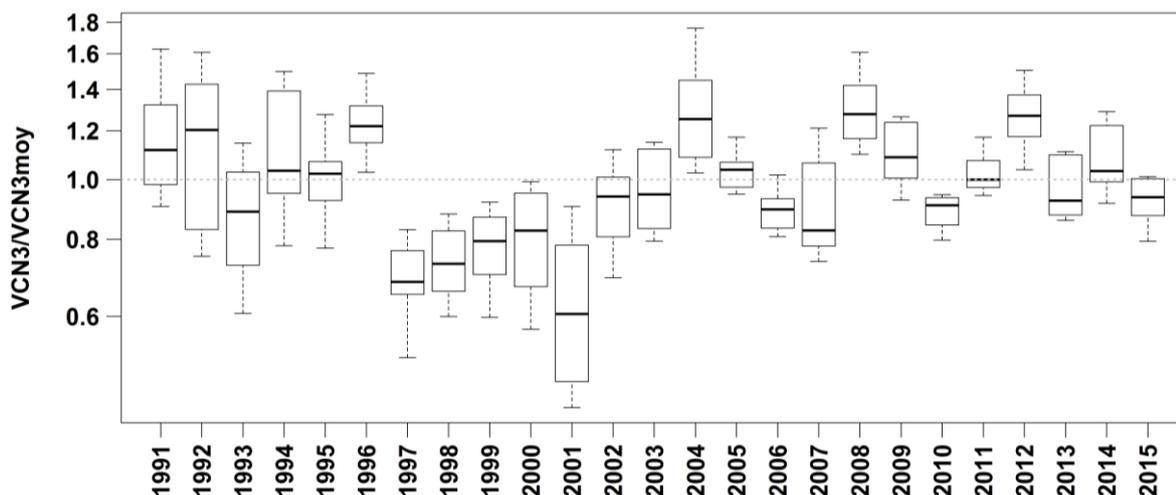


Figure 40 : Boîtes à moustache des VCN3 normalisés par la moyenne des VCN3 de chaque bassin en fonction de l’année. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 et 0.9 de la distribution de des VCN3 normalisés pour une année et pour l’ensemble des bassins versants

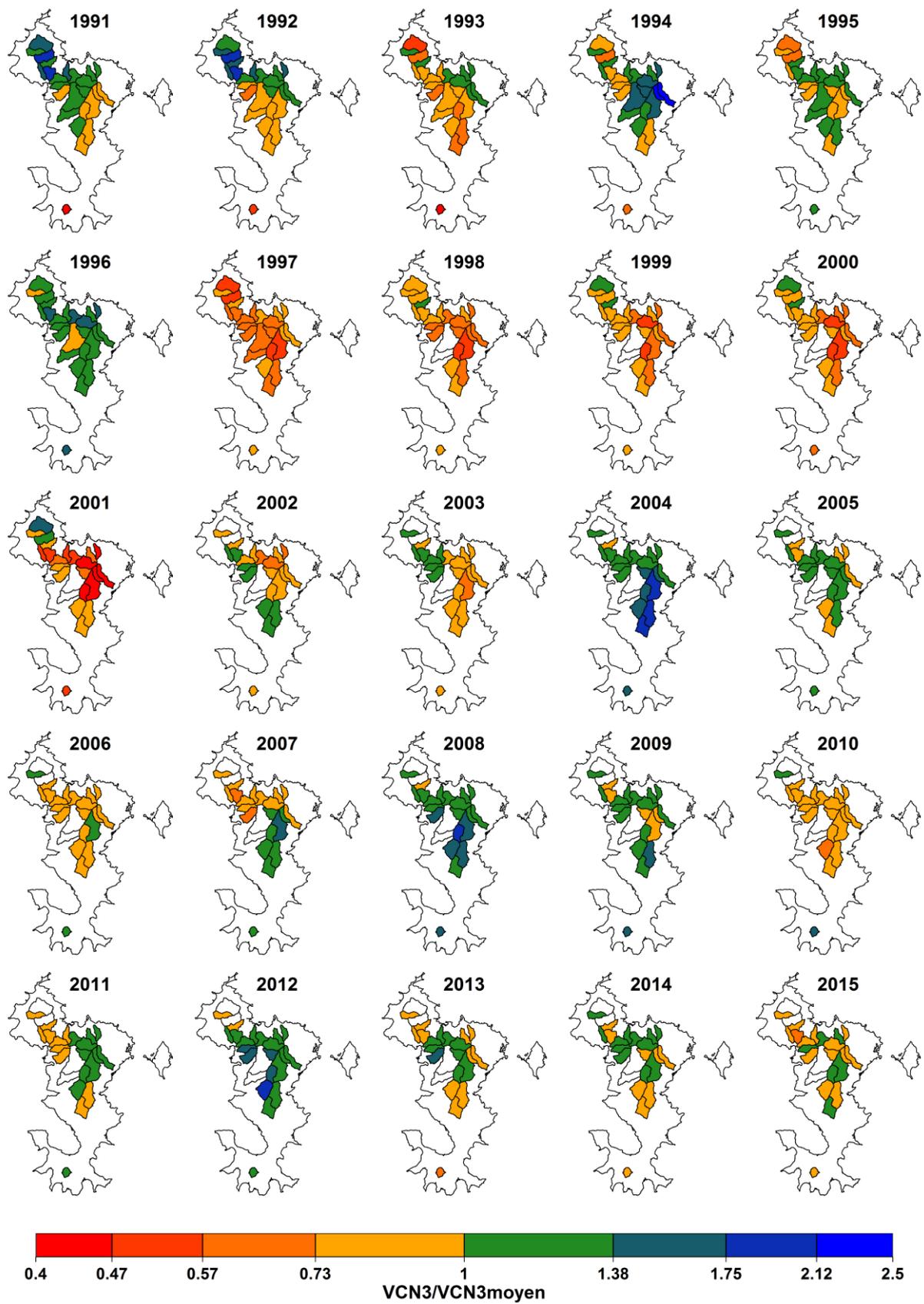


Figure 41 : Cartes annuels des VCN3 normalisés par la moyenne des VCN3 de chaque bassin

4.4.2 Qualité des ajustements de la loi log-normale à la distribution des VCN3

En hydrologie et plus spécifiquement pour les bas débits, les périodes de retour de certaines variables caractéristiques sont déterminées par des ajustements de loi qui décrivent la distribution de ces variables. Les distributions des VCN3 pour les stations de M'Gombani, Dzoumogné ouest et Mapouéra sont présentées à titre d'exemple sur la Figure 42. La courbe est le résultat de l'ajustement de la loi log-normale sur les valeurs de VCN3 (points noirs) par la méthode des moments. L'ajustement de la distribution des VCN3 à la loi log-normale montre de bons résultats dans l'ensemble, avec des écarts plus ou moins importants sur les différentes parties de la distribution.

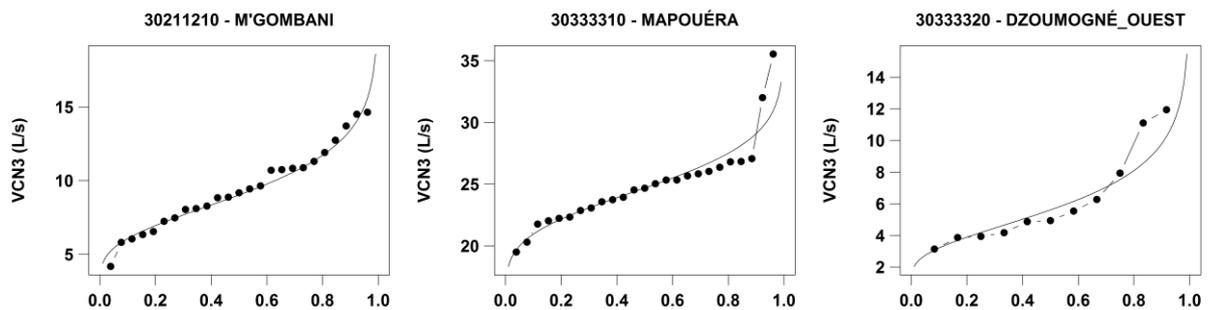


Figure 42 : Distribution des VCN3 (points) et ajustement de loi log-normale pour les stations de M'Gombani, Mapouéra et Dzoumogné ouest

La Figure 43 a) présente les écarts relatifs entre les VCN3 issus des simulations du modèle et l'ajustement de loi log-normale. Pour la majorité des bassins versants, les ajustements présentent des écarts relatifs aux VCN3 de plus ou moins 10%. Les écarts sur les quatre bassins versants influencés par les retenues sont de manière générale plus importants que sur les autres bassins (cf Dzoumogné ouest sur la Figure 42), du fait sans doute du plus faible nombre de valeurs dans l'échantillon pour réaliser l'ajustement. Les écarts importants sur certains bassins sont liés à la difficulté d'ajuster les valeurs fortes de VCN3 (cf. Mapouéra sur la Figure 42), néanmoins cela revêt une importance moindre dans la mesure où ce sont les 50% des valeurs les plus faibles qui permettent de déterminer les seuils.

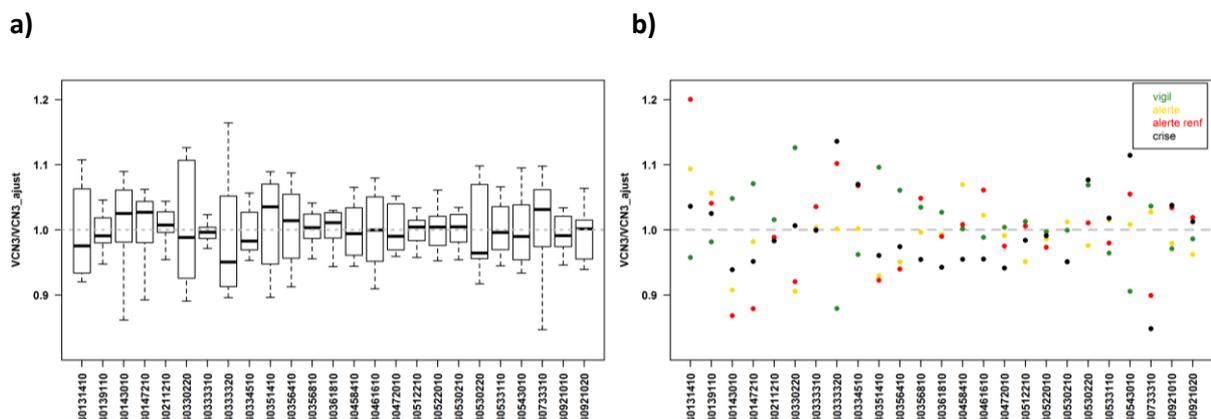


Figure 43 : a) Boîtes à moustache des écarts relatifs entre les VCN3 simulés par le modèle et l'ajustement de loi log-normale. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 et 0.9 de la distribution de ces écarts. b) Ecarts relatifs entre les seuils déterminés à partir des distributions des VCN3 et des ajustements de loi log-normale.

Les seuils correspondent aux périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans (respectivement pour les seuils de

vigilance, alerte, alerte renforcée et crise), ce qui correspond aux fréquences 50%, 20%, 10% et 5% de la distribution des VCN3. Les écarts relatifs entre les seuils déterminés à partir des distributions des VCN3 et des ajustements de loi log-normale varient entre -15% et +20% au maximum, et 90% des écarts sont inférieurs à 10% (environ 70% inférieurs à 5%). On retrouve sensiblement les écarts les plus importants sur les seuils là où les écarts entre distribution des VCN3 et ajustement de loi sont les plus importants. Aucune tendance globale à la sur ou sous-estimation n'est observable, et ce quelle que soit la période de retour associée au VCN3.

4.4.3 Sensibilité des seuils à l'ETP

Comme détaillé précédemment en partie 2.4, plusieurs formules d'évapotranspiration potentielle ont été testées en entrée du modèle hydrologique. Des valeurs telles que le module ou encore les débits mensuels ne sont quasiment pas impactées par une modification de la formule d'ETP utilisée. Néanmoins, les différences sont plus marquées sur des valeurs telles que les VCN3. La Figure 44 a) présente les écarts relatifs des VCN3 calculés à partir des deux formules d'ETP (Oudin et Penman). On observe aussi bien des surestimations (3011410, 30147210, 30733310, 30921010) que des sous-estimations (30330220, 30361810) systématiques sur certains bassins, avec une légère tendance à la surestimation des VCN3 avec la formule d'Oudin. Ceci pourrait être lié à la plus faible variabilité de l'ETP d'Oudin. Les écarts relatifs sur l'ensemble des bassins varient entre -25 et +40%, avec des écarts faibles (30361810, +/- 5% au maximum) comme important (30139110, -25 à +40% de différence). On retrouve les mêmes conclusions sur le calcul des seuils (Figure 44 b)).

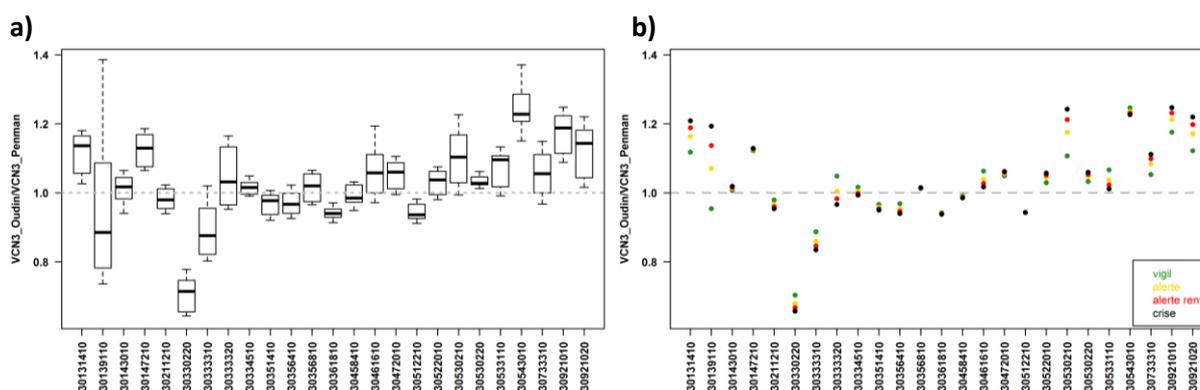


Figure 44 : Boîtes à moustache des écarts relatifs entre les VCN3 simulés (sans ajustement de loi) par le modèle avec les deux formules d'ETP. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 et 0.9 de la distribution de ces écarts. b) Ecarts relatifs entre les seuils déterminés à partir des ajustements réalisés sur les VCN3 simulés du modèle avec les deux formules d'ETP.

Le Tableau 12 présente le récapitulatif des écarts pour la qualité des ajustements de loi log-normale et la sensibilité des seuils à la formule d'ETP.

Tableau 12 : Récapitulatifs des écarts min et max pour la qualité des ajustements de loi log-normale et la sensibilité des seuils à la formule d'ETP utilisée

Code Hydro	Ecart relatifs (%) entre les seuils déterminés à partir de la distribution des VCN3 ou de l'ajustement de loi		Ecart relatifs (%) entre les seuils déterminés à partir des deux formules d'ETP (Oudin/Penman)	
	borne basse	borne haute	borne basse	borne haute
30131410	-4	20	12	21
30139110	-2	6	-5	19

Code Hydro	Ecart relatif (%) entre les seuils déterminés à partir de la distribution des VCN3 ou de l'ajustement de loi		Ecart relatif (%) entre les seuils déterminés à partir des deux formules d'ETP (Oudin/Penman)	
	borne basse	borne haute	borne basse	borne haute
30143010	-13	5	1	2
30147210	-12	7	12	13
30211210	-2	2	-5	-2
30330220	-9	13	-34	-30
30333310	0	4	-17	-11
30333320	-12	14	-3	5
30334510	-4	7	-1	2
30351410	-8	10	-5	-3
30356410	-6	6	-6	-3
30356810	-5	5	1	2
30361810	-6	3	-6	-6
30458410	-5	7	-1	-1
30461610	-4	6	2	6
30472010	-6	0	5	6
30512210	-5	1	-6	-6
30522010	-3	0	3	6
30530210	-5	1	11	24
30530220	-2	8	3	6
30533110	-4	2	1	7
30543010	-9	11	23	25
30733310	-15	4	5	11
30921010	-3	4	18	25
30921020	-4	2	12	22

Code Hydro	Vigilance (L/s) (P – Paj – Oaj)	Alerte (L/s) (P – Paj – Oaj)	Alerte renforcée (L/s) (P – Paj – Oaj)	Crise (L/s) (P – Paj – Oaj)
30131410	2.4 - 2.5 - 2.8	2.1 - 1.9 - 2.2	2 - 1.7 - 2	1.5 - 1.5 - 1.8
30139110	17.5 - 17.9 - 17	14.6 - 13.8 - 14.8	12.6 - 12.1 - 13.8	11.2 - 10.9 - 13
30143010	6.9 - 6.6 - 6.6	4.3 - 4.8 - 4.9	3.5 - 4.1 - 4.1	3.3 - 3.6 - 3.6
30147210	9.3 - 8.7 - 9.8	6.1 - 6.2 - 7	4.6 - 5.3 - 5.9	4.4 - 4.6 - 5.2
30211210	9.2 - 9 - 8.8	6.9 - 7 - 6.7	6 - 6.1 - 5.9	5.4 - 5.5 - 5.2
30330220	1.4 - 1.2 - 0.9	0.8 - 0.9 - 0.6	0.7 - 0.7 - 0.5	0.6 - 0.6 - 0.4
30333310	24.7 - 24.7 - 21.9	22.3 - 22.2 - 19.1	21.8 - 21 - 17.8	20.1 - 20.1 - 16.8
30333320	4.9 - 5.6 - 5.9	3.9 - 3.9 - 3.9	3.6 - 3.2 - 3.2	3.2 - 2.8 - 2.7
30334510	27.8 - 28.9 - 29.4	25.1 - 25 - 25.1	24.8 - 23.2 - 23.2	23.4 - 21.9 - 21.7
30351410	23.7 - 21.7 - 20.9	15.1 - 16.3 - 15.6	13 - 14.1 - 13.4	12 - 12.5 - 11.9
30356410	41 - 38.6 - 37.4	28.9 - 30.4 - 29	25.3 - 26.9 - 25.4	23.7 - 24.4 - 22.9
30356810	9.8 - 9.4 - 9.6	7.7 - 7.7 - 7.9	7.3 - 7 - 7.1	6.2 - 6.4 - 6.5
30361810	32.7 - 31.8 - 30	26.4 - 26.6 - 25	24 - 24.3 - 22.8	21.2 - 22.5 - 21.1
30458410	5.8 - 5.8 - 5.8	5.2 - 4.8 - 4.8	4.4 - 4.4 - 4.3	3.8 - 4 - 4
30461610	1.8 - 1.8 - 1.9	1.4 - 1.4 - 1.5	1.3 - 1.2 - 1.3	1.1 - 1.1 - 1.1
30472010	14.4 - 14.3 - 15.1	11.9 - 12 - 12.7	10.7 - 11 - 11.6	9.6 - 10.2 - 10.8

30512210	11.6 - 11.4 - 10.8	9.1 - 9.6 - 9.1	8.8 - 8.8 - 8.3	8 - 8.2 - 7.7
30522010	19.1 - 19.1 - 19.7	15 - 15.2 - 15.8	13.1 - 13.5 - 14.1	12.1 - 12.2 - 12.9
30530210	6 - 6 - 6.7	5 - 5 - 5.9	4.3 - 4.5 - 5.5	4 - 4.2 - 5.2
30530220	25.4 - 23.8 - 24.5	19 - 19.4 - 20.3	17.7 - 17.5 - 18.4	17.3 - 16.1 - 17.1
30533110	19.7 - 20.5 - 21.8	17.1 - 16.8 - 17.5	14.9 - 15.2 - 15.6	14.3 - 14 - 14.2
30543010	2.9 - 3.2 - 4	2.6 - 2.6 - 3.2	2.4 - 2.3 - 2.8	2.3 - 2.1 - 2.6
30733310	2.1 - 2.1 - 2.2	1.5 - 1.5 - 1.6	1.1 - 1.2 - 1.3	0.9 - 1.1 - 1.2
30921010	5.7 - 5.8 - 6.9	4.8 - 4.9 - 5.9	4.6 - 4.5 - 5.5	4.3 - 4.2 - 5.2
30921020	15.6 - 15.8 - 17.7	12 - 12.5 - 14.6	11.2 - 11 - 13.2	10.1 - 10 - 12.2

* P : ETP de Penman sans ajustement de loi ; Paj : ETP de Penman avec ajustement de loi ; Oaj ETP d'Oudin avec ajustement de loi

4.5 Analyse des seuils hydrométriques

4.5.1 Occurrence des situations à risque

La Figure 45 présente l'état des cours d'eau sur toutes les stations de Mayotte, basé sur les simulations de débit. Les stations ont été regroupées par unité de production. Les seuils calculés montrent une bonne cohérence temporelle : les années particulièrement sèches (1997 et 2001) sont bien visibles sur l'ensemble des stations, avec des situations de durée et sévérité importantes (jusqu'à la crise). On remarque que toutes les stations ne caractérisent pas les événements avec le même degré de sévérité : en 2001, 15 stations sur 25 atteignent le seuil de crise alors que 6 stations n'atteignent que le seuil de vigilance (la station M'ronabéja au sud de l'île ne l'atteint même pas). On retrouve également ces conclusions au niveau des différentes UP. L'UP d'Ourovéni est peu impactée par des épisodes de sécheresse, du fait d'une part de la présence de deux stations influencées sur quatre, pour lesquelles la retenue de Combani agit comme soutien d'étiage (30533110 et 30530220, respectivement Ourovéni pont et Ourovéni station). Il en est de même pour les stations à l'aval de la retenue de Dzoumogné (30333320 et 30330220, respectivement Dzoumogné ouest et Dzoumogné retenue) Ceci laisse penser qu'une sécheresse, même sévère n'atteint pas tous les bassins versants de la même manière, et permettrait d'agir spatialement sur les prélèvements de la ressource en termes de gestion.

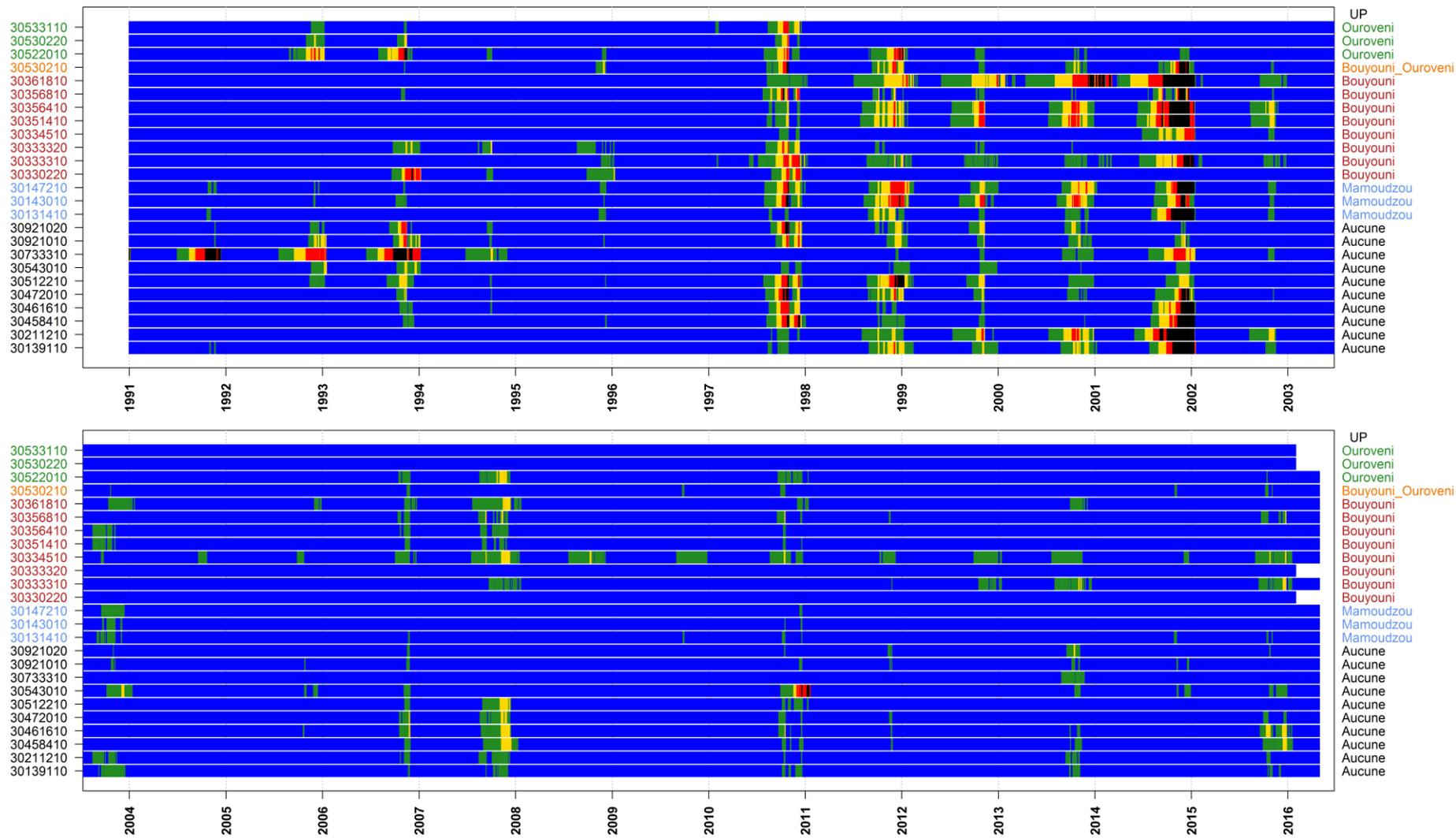
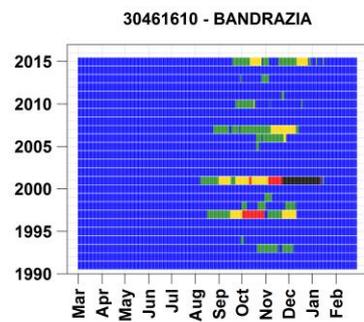
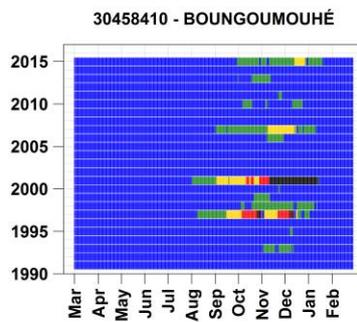
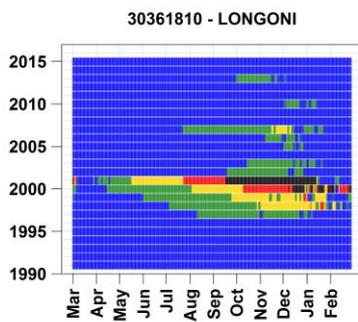
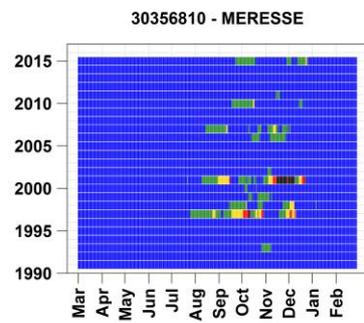
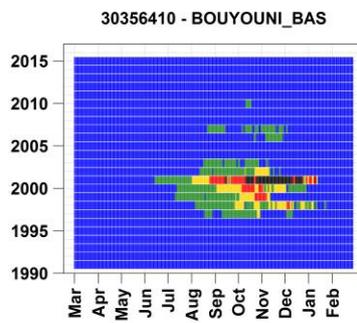
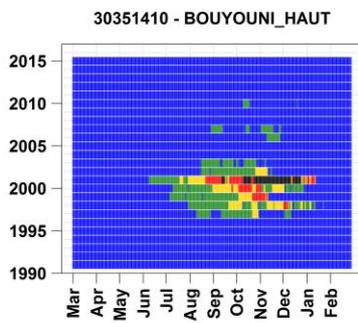
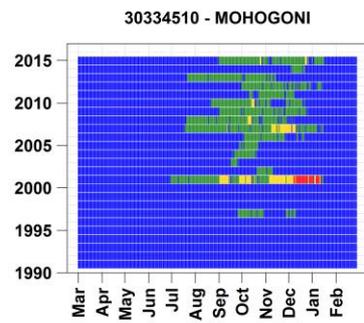
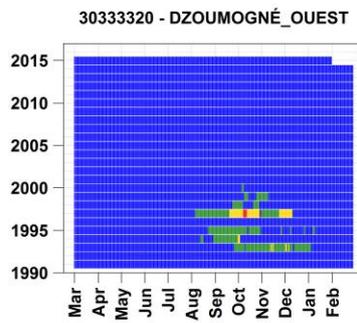
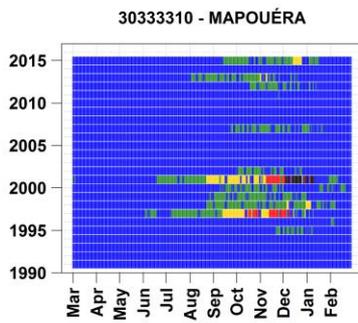
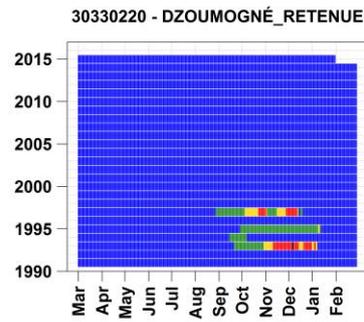
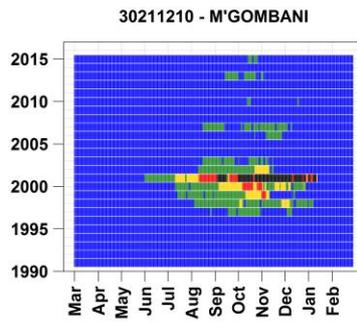
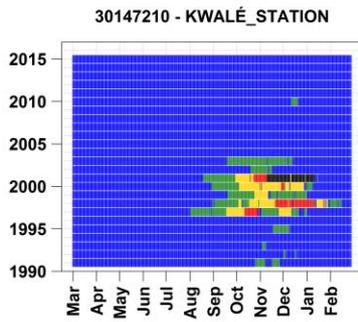
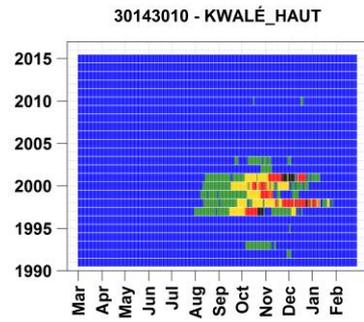
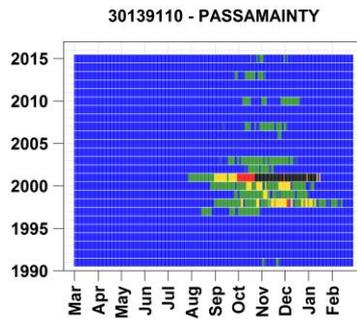
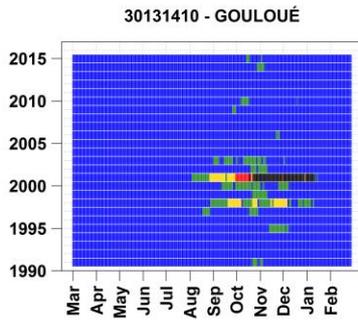


Figure 45 : Etat des cours d'eau (en bleu : situation normale, vert : vigilance, jaune : alerte, rouge : alerte renforcée, noir : crise)

La Figure 46 présente, pour chaque bassin versant, l'état des cours d'eau pour chaque année. On remarque que les étiages les plus sévères (inférieurs au seuil de crise) sont ceux qui durent le plus longtemps, qui commencent plus tôt dans l'année (passage sous seuil de vigilance) et qui finissent en général plus tard. Tous les bassins versants ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. Certains bassins sont peu souvent en période critique : c'est le cas pour les stations en aval des retenues collinaires : Dzoumogné retenue, Dzoumogné ouest, Ourovéni pont et Ourovéni station, mais également pour Dembéni haut et Dembéni bas. Pour certaines, les étiages peuvent être assez long (Longoni, Mapouéra M'Ronabéja avec des situations à risque plus de 6 mois) alors que d'autres peuvent ne pas excéder deux ou trois mois au maximum (Apandzo, Dembéni Haut, Dembéni bas).



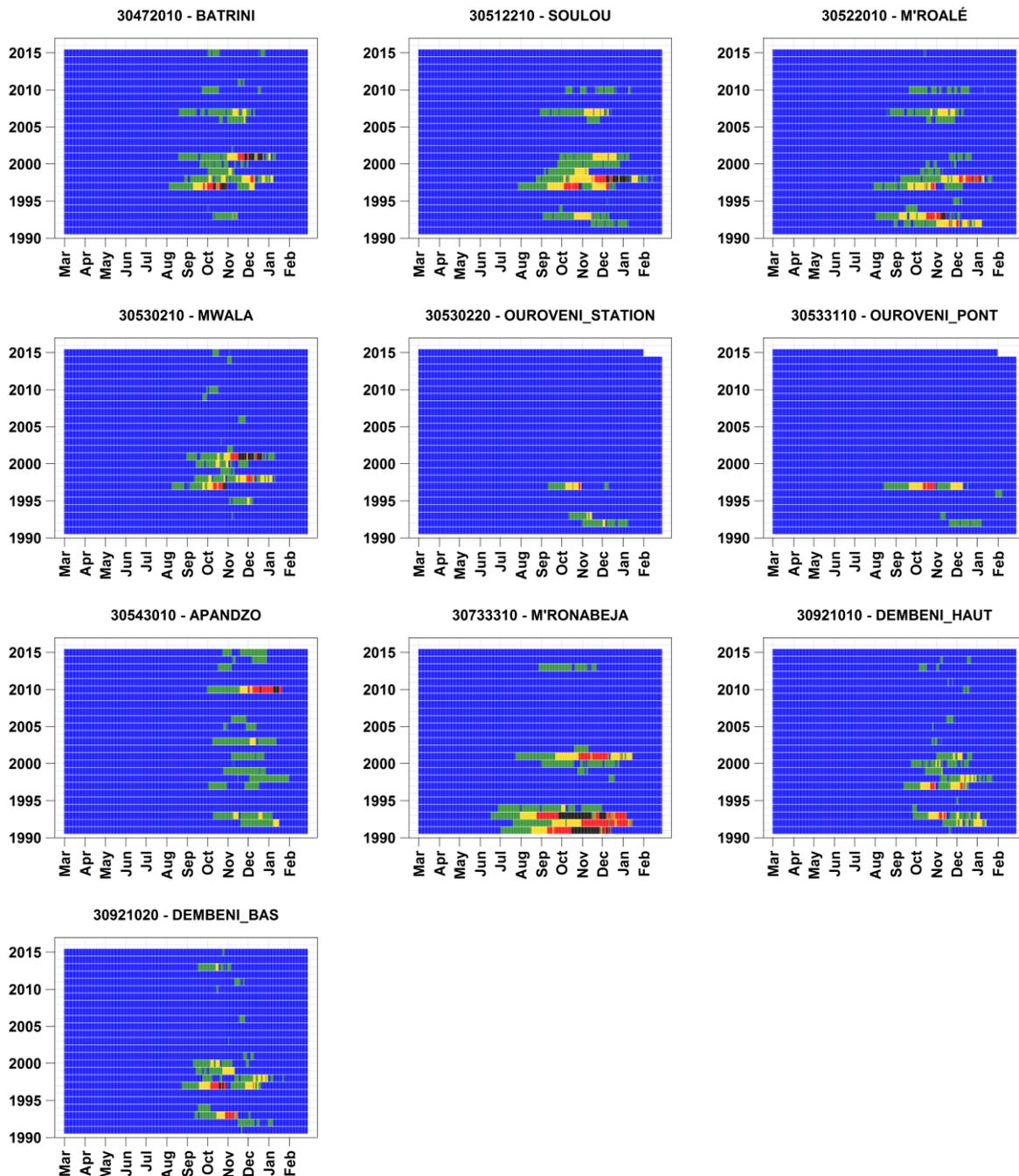


Figure 46 : Etat des cours d'eau dans l'année pour chaque bassin versant (en bleu : situation normale, vert : vigilance, jaune : alerte, rouge : alerte renforcée, noir : crise)

La Figure 47 présente le pourcentage du temps sur la période passé sous un seuil en fonction du nombre de stations, pour l'ensemble des stations, et pour les stations concernées par chaque unité de production. Pour l'ensemble des stations, on observe que s'il est possible qu'il y ait au moins une station en vigilance 35% du temps, la possibilité d'avoir de plus en plus de stations en même temps en situation de vigilance diminue fortement. On retrouve au maximum 4 stations en crise simultanément moins de 1% du temps. Ces probabilités de défaillance diminuent lorsque l'on observe le détail des UP, ce qui apparaît logique puisque le nombre de stations concerné par chaque UP est moindre. Ce graphique permet de montrer que si certains bassins sont en situation à risque, il

est peu probable que l'ensemble des ressources en eau de l'île soient soumises à des pénuries de manière simultanée.

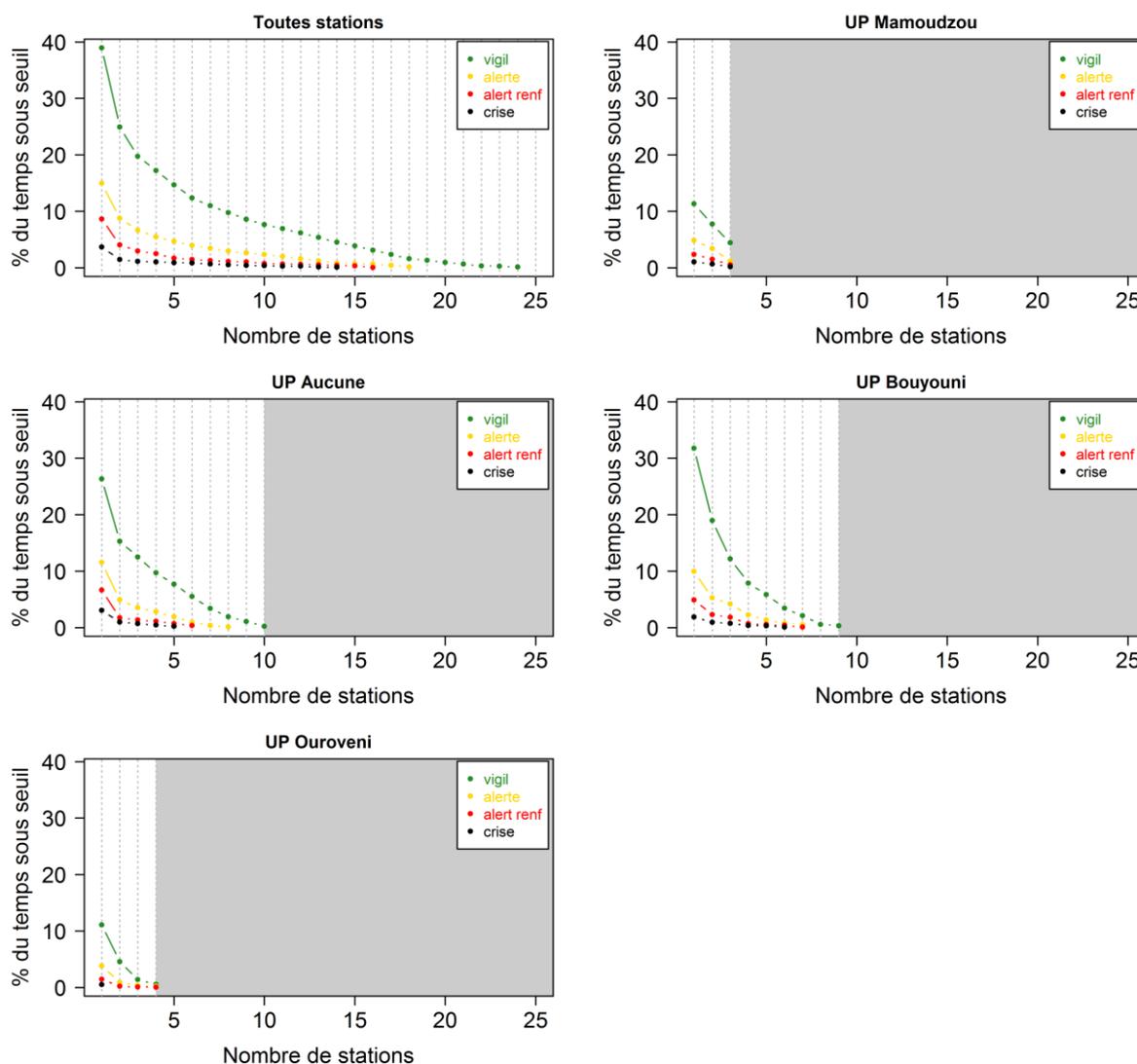


Figure 47 : Pourcentage du temps (1991-2016) passé sous un seuil en fonction du nombre de stations, pour toutes les stations (en haut à gauche), ainsi que pour les stations concernées par UP.

4.5.2 Comparaison des seuils aux débits biologiques

Les valeurs de seuil que nous proposons sont basées sur les débits simulés par le modèle hydrologique en utilisant la formule d'ETP de Penman. Les périodes de retour des seuils sont issues de l'ajustement de la distribution des VCN3 à la loi log-normale. Le Tableau 13 récapitule les seuils calculés, ainsi que le 10^{ème} du module et les bornes hautes et basses des débits minimum biologiques issus de l'étude d'ASCONIT (2009).

Tableau 13 : Récapitulatif des seuils et du 1/10^{ème} du module en L/s déterminés à partir des simulations de débit, ainsi que des Débits Minimums Biologiques en L/s issues de l'étude d'ASCONIT (2009)

Code Hydro	Station	Surf (km ²)	VCN3 2ans	VCN3 5ans	VCN3 10ans	VCN3 20ans	MODULE /10	DMBb	DMBh
30131410	GOULOUE	2,3	2,5	1,9	1,7	1,5	3,8	NA	NA

Code Hydro	Station	Surf (km ²)	VCN3 2ans	VCN3 5ans	VCN3 10ans	VCN3 20ans	MODULE /10	DMBb	DMBh
30139110	PASSAMAINTY	6,5	17,9	13,8	12,1	10,9	10,8	NA	NA
30143010	KWALÉ HAUT	4,0	6,6	4,8	4,1	3,6	3,9	1,8	3,5
30147210	KWALÉ STATION	12,1	8,7	6,2	5,3	4,6	11,5	5,5	10,6
30211210	M'GOMBANI	2,0	9	7	6,1	5,5	2,3	NA	NA
30330220	DZOUMOGNÉ RETENUE	7,5	1,2	0,9	0,7	0,6	1,5	16,1	23,6
30333310	MAPOUÉRA	3,0	24,7	22,2	21	20,1	4,2	NA	NA
30333320	DZOUMOGNÉ OUEST	15,3	5,6	3,9	3,2	2,8	3,3	33	48,3
30334510	MOHOGONI	2,7	28,9	25	23,2	21,9	4,3	NA	NA
30351410	BOUYOUNI HAUT	5,4	21,7	16,3	14,1	12,5	6,4	NA	NA
30356410	BOUYOUNI BAS	8,6	38,6	30,4	26,9	24,4	9,3	NA	NA
30356810	MERESSE	2,5	9,4	7,7	7	6,4	3,2	NA	NA
30361810	LONGONI	2,6	31,8	26,6	24,3	22,5	4,7	NA	NA
30458410	BOUNGOUMO UHÉ	2,1	5,8	4,8	4,4	4	1,4	7,7	10
30461610	BANDRAZIA	3,6	1,8	1,4	1,2	1,1	1	NA	NA
30472010	BATRINI	3,5	14,3	12	11	10,2	3,8	NA	NA
30512210	SOULOU	2,9	11,4	9,6	8,8	8,2	2,3	NA	NA
30522010	M'ROALÉ	4,6	19,1	15,2	13,5	12,2	5,2	NA	NA
30530210	MWALA	3,3	6	5	4,5	4,2	5,5	NA	NA
30530220	OOUROVENI STATION	18,7	23,8	19,4	17,5	16,1	15,6	NA	NA
30533110	OOUROVENI PONT	13,9	20,5	16,8	15,2	14	13	NA	NA
30543010	APANDZO	6,1	3,2	2,6	2,3	2,1	3,3	NA	NA
30733310	M'RONABEJA	1,7	2,1	1,5	1,2	1,1	0,6	NA	NA
30921010	DEMBENI HAUT	5,1	5,8	4,9	4,5	4,2	4,5	5,2	6,6
30921020	DEMBENI BAS	11,9	15,8	12,5	11	10	10,7	12,2	15,5

On remarque que pour les cours d'eau qui présentent de faibles débits (Gouloué, Dzoumogné retenue, Dzoumogné ouest, Bandrazia, Apandzo, M'Ronabéja, Dembéni haut), les valeurs de seuils sont très rapprochées, et de l'ordre de l'incertitude de mesure du débit. Ceci rend difficile la mise en œuvre de ces seuils dans la gestion opérationnelle. Pour ces stations, l'établissement de plusieurs seuils n'as pas de sens, il pourrait être décidé de n'en conserver qu'un ou deux pour la gestion.

Sur les stations où un Débit Minimum Biologique a été déterminé, les seuils inférieurs au DMB doivent être remplacés par cette valeur. Ici, nous disposons de deux fourchettes hautes et basses du DMB. En l'absence de DMB, le 1/10^{ème} du module est défini comme seuil critique à ne pas sous-passer. Par conséquent, les seuils inférieurs au 1/10^{ème} module doivent être remplacés par cette valeur. Le Tableau 14 présente les stations sur lesquelles les seuils déterminés sont inférieurs au DMB ou au 10^{ème} du module.

Tableau 14 : Stations sur lesquelles le 10^{ème} du module ou le débit minimum biologique est supérieur aux seuils

Seuil <	Module/10	DMB borne basse	DMB borne haute
Crise	Kwalé haut, Dembéni bas	-	-
Alerte renforcée	Dzoumogné ouest, Dembéni haut	Kwalé station, Dembéni bas	-
Alerte	Dzoumogné retenue, Mwala	Dembéni haut	Dembéni bas
Vigilance	Gouloué, Kwalé station, Apandzo	Dzoumogné retenue, Dzoumogné ouest, Boungomouhé	Kwalé station, Dzoumogné retenue, Dzoumogné ouest, Boungomouhé, Dembéni haut

Comme sur l'île de la Réunion, dans le cas de Mayotte, la forte variabilité entre les faibles et les forts débits peut conduire à des débits moyens (module) très élevés par rapport aux basses eaux, le module n'étant dans ces cas-là pas très représentatif de la ressource disponible. C'est le cas pour les stations répertoriées ci-dessus, qui présentent les écarts-types sur les débits simulés les plus importants parmi l'ensemble des stations.

Pour les stations où le DMB est supérieur à plusieurs seuils, voire tous, il serait nécessaire de proposer des seuils qui permettent la mise en place de mesures progressives de restriction. On remarquera particulièrement les cas de Dzoumogné ouest et Dzoumogné retenue, où les fourchettes de DMB sont très supérieures aux valeurs de seuils (de l'ordre de 10 fois plus). Ces différences pourraient venir du fait que nous avons choisi de déterminer les seuils sur des débits avant construction de la retenue (le régime de la rivière étant fortement modifié après construction, avec des débits d'étiage fortement soutenus), d'où des seuils plus faibles que si toute la période avait été prise en compte. Nous ne disposons pas de DMB pour les stations concernées par la retenue de Combani (Ourovéni pont et Ourovéni station), mais nous aurions probablement le même cas de figure.

A l'inverse, pour d'autres stations, le 1/10^{ème} du module ou le DMB sont nettement inférieurs au seuil de crise (Mapouéra, Mohogoni, Longoni, Soulou, où le seuil de crise est supérieur à 3 fois le module par exemple), les seuils pourraient être modulés pour permettre une gestion moins sévère de la ressource.

4.6 Tableau récapitulatif des seuils sécheresse par station

Le Tableau 15 synthétise par bassin versant les débits réservés actuellement utilisés par la DEAL, les modules calculés au cours de cette étude issus des résultats de modélisation, les indices de fiabilité des résultats de modélisation ainsi que les biais (rapports du débit observé sur le débit simulé) médians obtenus sur tous les débits et sur les bas débits, ainsi que les unités de production dont dépendent les stations de captage.

Le Tableau 16 récapitule les seuils sécheresse simulés et proposés dans cette étude après une étape de débiaisage (application du rapport médian des débits observés et simulés, calculé sur les bas

débites) ainsi que le temps de passage moyen entre les différents seuils. Ces temps de passage sont compatibles avec une gestion opérationnelle et la réunion d'un comité sécheresse qui aura pour but de décider des mesures de restriction à appliquer. On retrouve au minimum 12 jours entre deux situations. A noter qu'une sortie de situation critique est en général assez rapide puisqu'un évènement pluvieux peut avoir pour conséquence le passage d'une situation de crise à une situation normale.

Pour plusieurs stations aux débits d'étiage très faibles ($Q < 10L/s$), les différences entre certains seuils est de l'ordre de l'erreur de mesure. Nous proposons de réaliser la gestion sur seulement deux seuils (VCN3 2ans et 5 ans) pour ces bassins versants. Pour les autres stations, il est toujours possible de réaliser la gestion sur 4 seuils.

Les seuils sont globalement plus forts que le dixième du module actuellement utilisé par la DEAL (Module/10 DEAL est souvent inférieur au VCN3 20ans estimé). Les différences entre le module/10 simulé et le module/10 déterminé par la DEAL peuvent venir de différents éléments :

- les périodes différentes sur lesquelles ont été calculés les modules (1990-2015 pour les simulés, selon la disponibilité des données observées pour la DEAL, cf Tableau 2) ;
- le faible nombre de jaugeages et leur focalisation sur les bas débits, qui peuvent amener les modules simulés à être supérieurs aux modules calculés par la DEAL.
- l'exclusion des données considérées comme douteuses, qui peut amener à avoir un débit moyen observé différent de celui calculé par la DEAL. La prise en compte d'une composante de bilan dans la fonction objectif utilisée pour caler le modèle amènera le modèle à simuler un débit moyen proche du débit moyen observé où les données douteuses ont été exclues plutôt que du débit moyen calculé par la DEAL.

L'indice de fiabilité nous donne une idée du degré de confiance que l'on peut accorder à l'estimation de ces seuils sécheresse et devra être considéré lors de leur application.

Tableau 15. Tableau récapitulatif des débits réservés utilisés par la DEAL (10^e du module), des Débits Minimums Biologiques issues de l'étude d'ASCONIT (2009), du 10^e du module obtenu à partir des simulations de débit avec le modèle GR4J, de ce 10^e de module débiaisé (application rapport médian des débits observés et simulés calculé sur tous les débits) en L/s, des indices de fiabilité des résultats de modélisation et des unités de production dont dépendent les stations de captage (en orange clair) et les stations en amont de ces stations de captage (en vert clair).

Code Hydro	Station	Surf (km ²)	Qobs/Qsim médian bas débits	Qobs/Qsim médian tous débits	Module/10 simulé (L/s)	Module/10 simulé débiaisé (L/s)	Module/10 DEAL (L/s)	DMBb (L/s)	DMBh (L/s)	Nombre de données observées de débit	Indice fiabilité modélisation	Influence agricole ou AEP	Unité de Production	Retenue dans la même UP
30131410	GOULOUÉ	2,32	0,83	0,88	3,8	3,3	1,64	-	-	308	++	faible	Mamoudzou	-
30139110	PASSAMAINTY	6,49	0,96	0,95	10,8	10,3	-	-	-	65	+++	-	-	-
30143010	KWALÉ HAUT	4,03	1,02	1	3,9	3,9	1,85	1,8	3,5	311	+++	faible	Mamoudzou	-
30147210	KWALÉ STATION	12,07	0,9	0,86	11,5	9,9	-	5,5	10,6	283	+++	-	Mamoudzou	-
30211210	M'GOMBANI	2,03	0,9	0,96	2,3	2,2	-	-	-	72	+++	-	-	-
30330220	DZOUMOGNÉ RETENUE	10,43	0,84	0,73	1,5	1,1	-	16,1	23,6	204	+	-	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30333310	MAPOUÉRA	2,98	0,93	0,93	4,2	3,9	4	-	-	193	+++	-	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30333320	DZOUMOGNÉ OUEST	15,25	0,83	0,85	3,3	2,8	-	33	48,3	188	++	-	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30334510	MOHOGONI	2,65	0,96	0,97	4,3	4,2	4,2	-	-	250	++	faible	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30351410	BOUYOUNI HAUT	5,36	1,06	0,91	6,4	5,8	5,8	-	-	76	+++	-	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30356410	BOUYOUNI BAS	8,61	0,82	0,96	9,3	8,9	13	-	-	107	++	-	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30356810	MERESSE	2,5	1,04	0,98	3,2	3,1	3,3	-	-	801	++	faible	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30361810	LONGONI	2,56	0,89	0,86	4,7	4,0	3,1	-	-	88	++	faible	Bouyouni	Dzoumogné et Combani
30458410	BOUNGOMOUHÉ	2,06	0,89	0,91	1,4	1,3	-	7,7	10	352	++	faible	-	-
30461610	BANDRAZIA	3,56	0,74	0,8	1	0,8	-	-	-	287	+	faible	-	-
30472010	BATRINI	3,45	0,73	0,98	3,8	3,7	-	-	-	176	+	faible	-	-
30512210	SOULOU	2,92	1,43	1,05	2,3	2,4	-	-	-	69	+	faible	-	-
30522010	M'ROALÉ	4,57	0,86	0,92	5,2	4,8	5,7	-	-	538	++	faible	Ourovéni	Combani
30530210	MWALA	3,26	1,43	1,18	5,5	6,5	-	-	-	693	+	faible	Bouyouni et Ourovéni	Combani
30530220	OOUROVENI STATION	18,72	0,92	0,96	15,6	15,0	13,5	-	-	332	+++	-	Ourovéni	Combani
30533110	OOUROVENI PONT	13,88	1,1	1,01	13	13,1	-	-	-	173	+++	-	Ourovéni	Combani
30543010	APANDZO	6,1	0,42	0,59	3,3	1,9	-	-	-	374	+	-	-	-
30733310	M'RONABEJA	1,72	0,49	0,81	0,6	0,5	-	-	-	227	+	-	-	-
30921010	DEMBENI HAUT	5,08	0,66	0,81	4,5	3,6	-	5,2	6,6	363	+	-	-	-
30921020	DEMBENI BAS	11,89	0,8	0,9	10,7	9,6	-	12,2	15,5	618	++	-	-	-

Tableau 16. Tableau récapitulatif des seuils sécheresse calculés et proposés dans cette étude après débiaisage (application du rapport médian des débits observés et simulés calculé sur les bas débits), ainsi que le temps de passage moyen entre les différents seuils.

Code Hydro	Station	Surf (km²)	VCN3 simulés (L/s)				Temps de passage moyen entre les seuils (jours)			VCN3 proposés (L/s)			
			VCN3 2ans	VCN3 5ans	VCN3 10ans	VCN3 20ans	vigil - alerte	alerte - ale renf	ale renf - crise	VCN3 2ans	VCN3 5ans	VCN3 10ans	VCN3 20ans
30131410	GOULOUÉ	2,32	2,5	1,9	1,7	1,5	23	34	18	2			
30139110	PASSAMAINTY	6,49	17,9	13,8	12,1	10,9	38	45	23	17	12		
30143010	KWALÉ HAUT	4,03	6,6	4,8	4,1	3,6	48	28	25	7	4		
30147210	KWALÉ STATION	12,07	8,7	6,2	5,3	4,6	39	30	20	8	5		
30211210	M'GOMBANI	2,03	9	7	6,1	5,5	64	28	24	8	5		
30330220	DZOUMOGNÉ RETENUE	10,43	1,2	0,9	0,7	0,6	60	15	25	1			
30333310	MAPOUÉRA	2,98	24,7	22,2	21,0	20,1	112	54	25	23	20		
30333320	DZOUMOGNÉ OUEST	15,25	5,6	3,9	3,2	2,8	47	18	-	5	3		
30334510	MOHOGONI	2,65	28,9	25	23,2	21,9	61	97	-	28	22		
30351410	BOUYOUNI HAUT	5,36	21,7	16,3	14,1	12,5	63	37	21	23	15		
30356410	BOUYOUNI BAS	8,61	38,6	30,4	26,9	24,4	60	37	20	32	22		
30356810	MERESSE	2,5	9,4	7,7	7,0	6,4	40	28	34	10	7		
30361810	LONGONI	2,56	31,8	26,6	24,3	22,5	118	57	29	28	22		
30458410	BOUNGOUMOUHÉ	2,06	5,8	4,8	4,4	4,0	53	30	25	5	4		
30461610	BANDRAZIA	3,56	1,8	1,4	1,2	1,1	35	28	43	1			
30472010	BATRINI	3,45	14,3	12	11,0	10,2	46	31	12	10	8		
30512210	SOULOU	2,92	11,4	9,6	8,8	8,2	49	34	22	16	13		
30522010	M'ROALÉ	4,57	19,1	15,2	13,5	12,2	57	28	21	16	12		
30530210	MWALA	3,26	6	5	4,5	4,2	34	31	14	9	6		
30530220	OUROVENI STATION	18,72	23,8	19,4	17,5	16,1	28	20	-	22	16		
30533110	OUROVENI PONT	13,88	20,5	16,8	15,2	14,0	38	21	-	23	17		
30543010	APANDZO	6,1	3,2	2,6	2,3	2,1	46	12	18	1			
30733310	M'RONABEJA	1,72	2,1	1,5	1,2	1,1	61	32	23	1			
30921010	DEMBENI HAUT	5,08	5,8	4,9	4,5	4,2	27	16	-	4	3		
30921020	DEMBENI BAS	11,89	15,8	12,5	11,0	10,0	38	15	13	13	9		

5 Implication de la mise en place des seuils pour la gestion de la ressource en eau

5.1 Eléments de contexte

Dans l'analyse proposée ici, nous ne considérerons pas les prélèvements agricoles pour lesquels aucune donnée n'existe aujourd'hui et qui ne font pas l'objet de mesures (par exemple par des compteurs). L'analyse ne sera donc fondée que sur les prélèvements réalisés pour l'alimentation en eau potable (AEP), placée sous la responsabilité du SIEAM, déléguée à la SMAE. Rappelons que l'AEP repose sur trois sources de prélèvement :

- eaux de surface : il s'agit de la ressource la plus facilement accessible, avec un certain nombre de points de prélèvements en rivière répartis sur l'île et la mobilisation de deux retenues collinaires (Combani et Dzoumogné). Ces deux retenues apportent un complément indispensable et une sécurisation de la ressource lorsque les autres sources d'approvisionnement viennent à manquer ;
- eaux souterraines : il s'agit d'une ressource qui permet d'assurer des volumes relativement stables tout au long de l'année (environ 25% de la production). Il n'y a pas de contrainte forte sur les prélèvements souterrains ;
- dessalement de l'eau de mer : il ne concerne que Petite Terre et ne sera pas analysé plus en détail ici, Petite Terre ne présente pas de réseau pérenne de surface, sujet de la présente étude.

Le réseau de distribution d'eau à l'échelle de l'île est relativement peu interconnecté (Figure 48), créant des groupes fonctionnels autour de six unités de production permettant le traitement de l'eau. Ces unités sont alimentées par 37 captages sur l'île (situés majoritairement dans la partie nord) (ARTELIA, 2012) :

- 14 prises d'eau de surface ;
- 3 prises d'eau en retenue collinaire (2 sur la retenue de Combani, 1 sur la retenue de Dzoumogné). A noter que la retenue de Dzoumogné est alimentée par par deux ouvrages de dérivation des eaux superficielles) ;
- 2 captages par drains peu profonds ;
- 17 forages d'eau souterraine ;
- 1 prise d'eau en mer sur Petite terre

L'eau prélevée à la retenue de Dzoumogné est redistribuée à l'usine de traitement de Bouyouni alors que l'eau prélevée à la retenue de Combani est acheminée aux deux usines de traitement de Bouyouni et Orovéni.

Réseau d'exploitation pour l'AEP

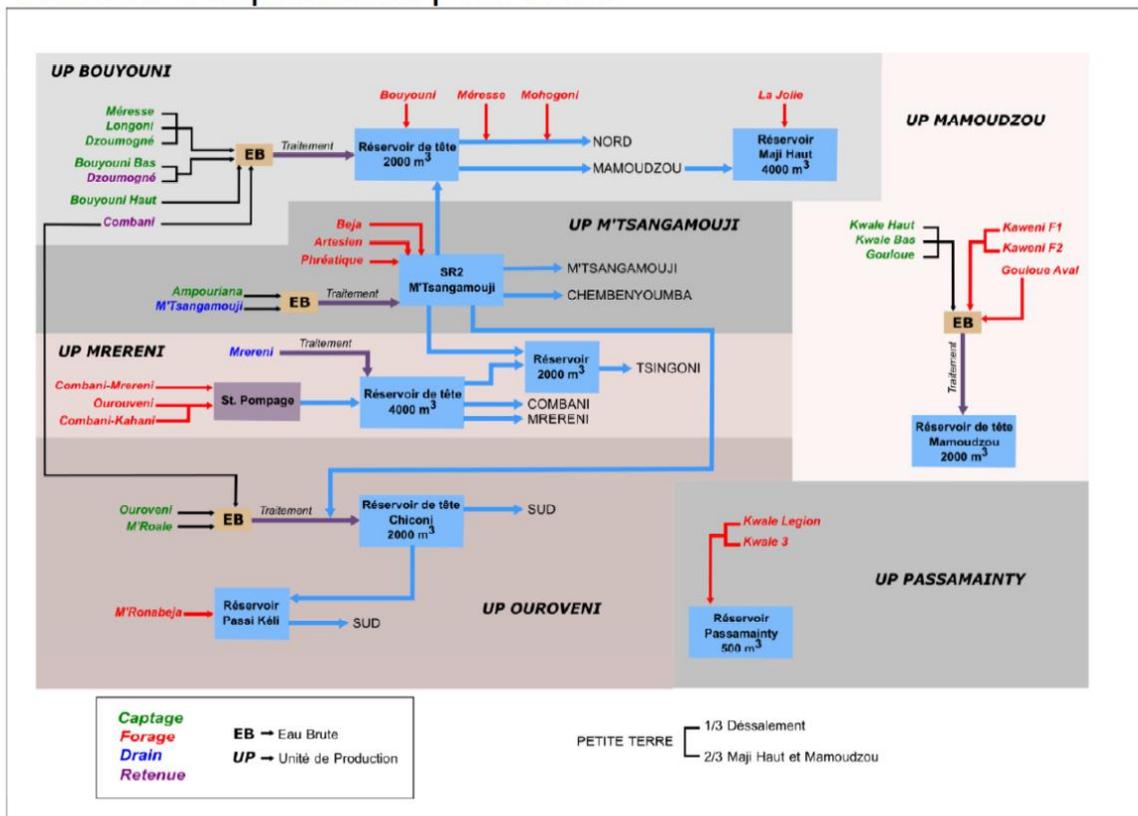


Figure 48. Schéma du réseau d'exploitation pour l'alimentation en eau potable de Mayotte

La Figure 49 rassemble par unité de production les stations de captage et les stations situées à l'amont de celles-ci ou de retenues (stations qui sont relativement importantes à surveiller pour l'estimation de la ressource en eau pour l'AEP) de notre base de données. Nous constatons que les stations sélectionnées pour cette étude sont réparties sur trois unités de production :

- Mamoudzou (trois stations),
- Bouyouni (6 stations, Mohogoni n'est pas représentée sur le réseau d'exploitation mais est reliée à l'UP de Bouyouni),
- Oourovéni (trois stations, dont Mwala en amont de la retenue de Combani).

Au niveau de ces stations de captage, le réseau de distribution n'est pas interconnecté. Toutefois, pour la station de Mwala qui ne constitue pas une station de captage mais une station située juste à l'amont de la retenue de Combani, l'eau arrivant et prélevée au niveau de cette retenue sera par la suite redistribuée au niveau de deux unités de production (Bouyouni et Oourovéni). Les stations de captage doivent être en mesure d'apporter un volume minimal pour assurer le bon fonctionnement des stations de traitement et l'approvisionnement en eau potable (10000 m³/j pour les UP de Bouyouni et Oourovéni, 3000 m³/j pour l'UP de Mamoudzou, 800 m³/j pour l'UP de M'réreni, et 400 m³/j pour l'UP de M'Tsangamouji).

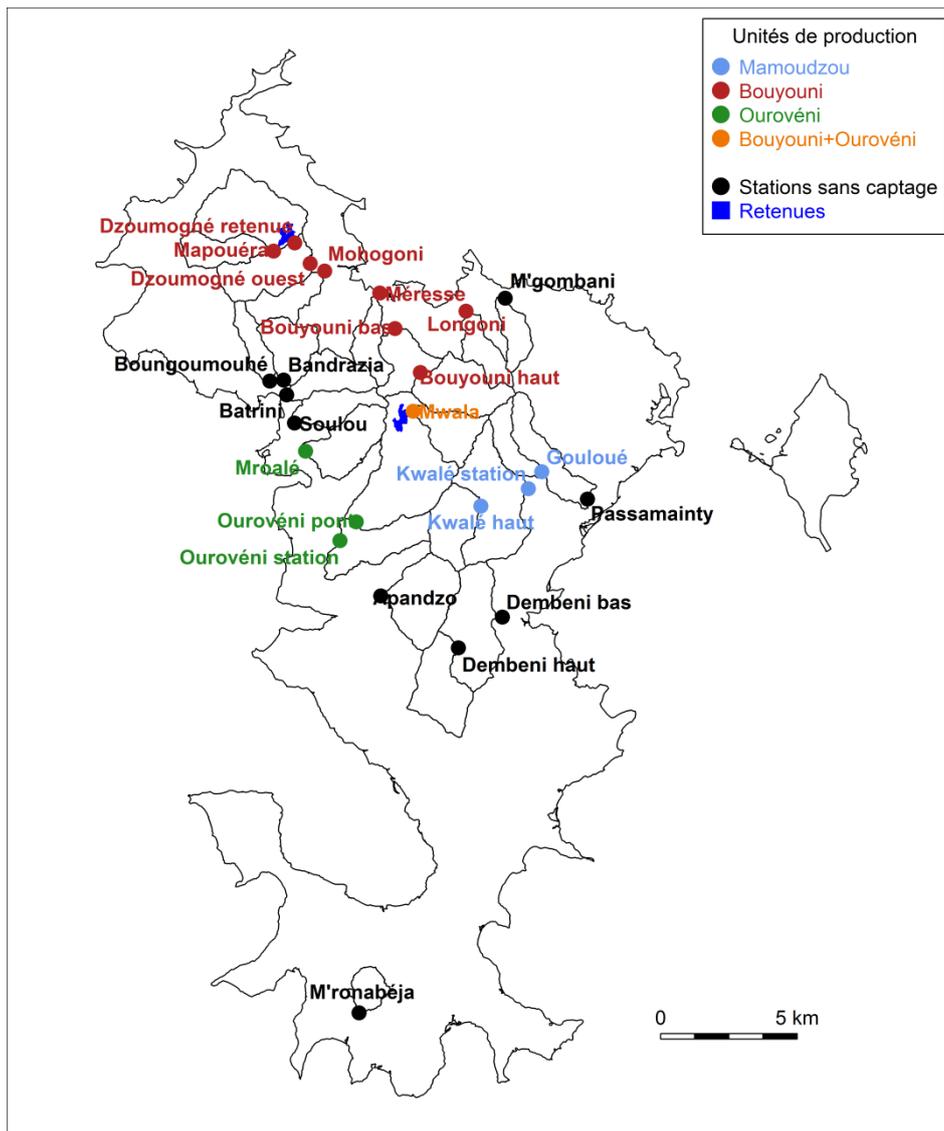


Figure 49. Regroupement des stations de captage et des stations situés en amont des stations de captage de notre base de données par unité de production.

Une contrainte forte imposée sur le système est la croissance démographique de l'île, occasionnant une augmentation de la demande d'environ 6% par an (Figure 50), voire 10% pour la période la plus récente.

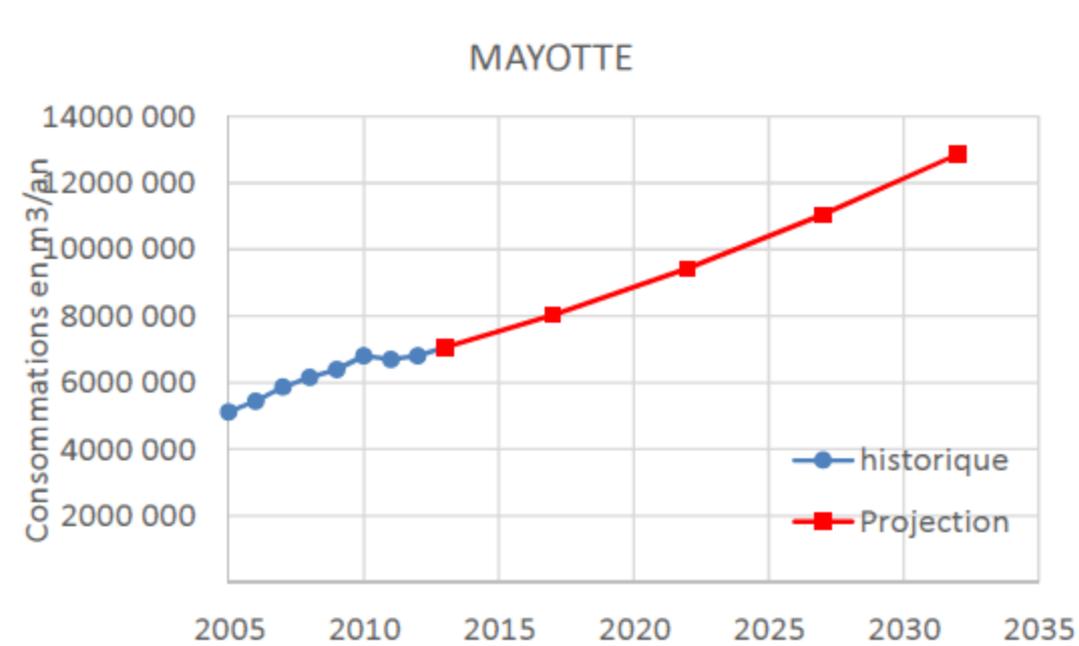


Figure 50 : Projection des consommations annuelles à Mayotte (source : SDAGE Mayotte 2016-2021)

5.2 Modalités de gestion actuelle

La gestion des prélèvements dans les eaux de surface ne présente aujourd'hui pas de stratégie clairement définie en termes de volumes ou de priorisation des différentes ressources ou points de prélèvements. Elle est faite davantage en fonction de l'expérience du gestionnaire et de la connaissance des contraintes sur le réseau. De manière générale, le captage en rivière est privilégié en période humide. En saison sèche, les prélèvements en nappe et dans les retenues sont plus accessibles.

Un point important est qu'il n'y a actuellement pas d'application de débits réservés, les points de captage en rivière n'étant pour la plupart pas équipés pour laisser passer un débit réservé. En période d'étiage, les stations fonctionnent en mode binaire, en laissant passer toute l'eau lorsque les pompes sont inactives, et en ne laissant au contraire rien transiter lorsque les pompes sont en marche.

La contrainte principale actuelle pour l'exploitant est le volume minimal mobilisable par unité de production. En effet, passer en dessous d'un seuil de débit d'entrée à la station de traitement impose d'arrêter son fonctionnement.

Rappelons par ailleurs qu'il n'y a pas d'utilisation de système de prévision quantitative des apports, qui permettrait d'anticiper les évolutions à venir de la ressource, et donc d'optimiser les stocks.

5.3 Implications de la mise en place des seuils

La prise en compte de seuils d'étiage et la mise en place de restrictions progressives doivent pouvoir assurer à la fois les différents usages de l'eau, et un débit minimum en priorisant l'alimentation en eau potable de la population. Les mesures de restrictions, principalement sur les prélèvements agricoles, auront pour conséquence de maintenir une meilleure disponibilité en eau dans les cours

d'eau pour l'AEP. La prise en compte de seuils devrait modifier les pratiques actuelles, en permettant de laisser transiter un débit minimum en aval des stations.

La Figure 51 présente la proportion des différentes sources de prélèvement par mois pour l'année 2015, ainsi que la distribution du nombre moyen de jours passés sous chaque seuil (vigilance en vert, alerte en jaune, alerte renforcée en rouge et crise en noir) pour chaque mois, sur la période 1990-2015 et pour toutes les stations. La part de l'AEP liée à l'usine de dessalement et aux forages est relativement stable dans le temps (3 à 4% pour le dessalement, 18 à 24% pour les forages). Elle est plus variable pour les captages en rivière et les retenues (46 à 78% pour les captages, 0 à 28% pour les retenues en cumulé). Lorsque les plus faibles pourcentages de production provenant de la part des captages sont observés, nous retrouvons de forts pourcentages de production de la part des retenues, ce qui montre bien que ces dernières soutiennent les prélèvements en rivière en situation d'étiage. On remarque que les périodes où les prélèvements en rivière sont moindres (moins de 50% de l'AEP) sont les mois d'octobre, novembre et décembre. Si nous ne disposons que des données pour l'année 2015, on peut supposer que ces proportions s'appliquent pour les autres années. La distribution du nombre de jours moyen sous seuil montre que la plupart des situations sous vigilance et en crise ont lieu sur les périodes d'octobre à novembre, et peuvent être variables (par exemple le nombre moyen de jours sous le seuil de vigilance peut varier de 2 à 16 jours au mois d'octobre selon les stations). Ce nombre de jours ainsi que la variabilité diminuent avec la gravité de la situation. Les situations de crise apparaissent moyennement très rarement, ce qui signifie que des contraintes fortes sur les prélèvements pour assurer un débit minimum sont assez faibles. Les périodes où les prélèvements en rivière et dans les retenues deviennent respectivement plus faibles et plus forts correspondent aux mois où l'on se retrouve en situation plus critique. La mise en place de mesures de restriction correspond bien aux mois où la tension sur la ressource est la plus forte.

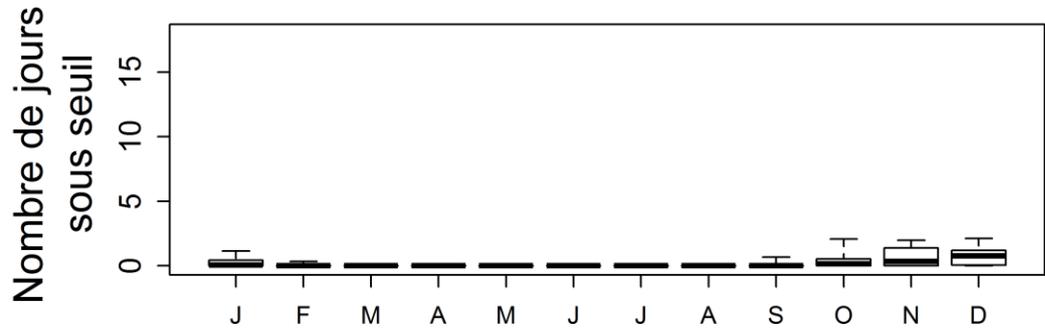
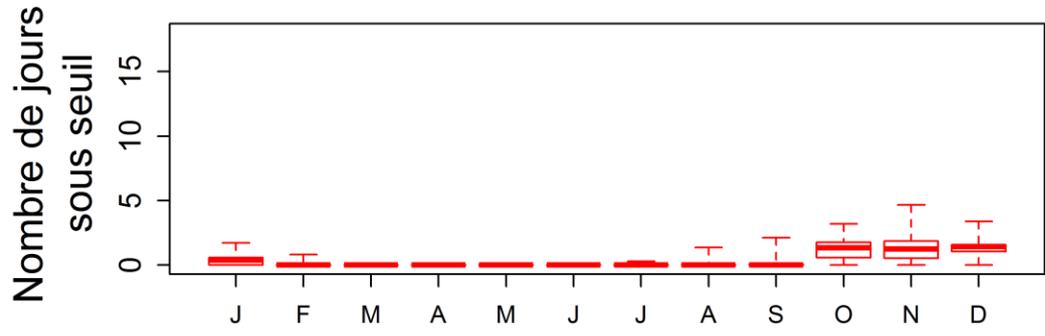
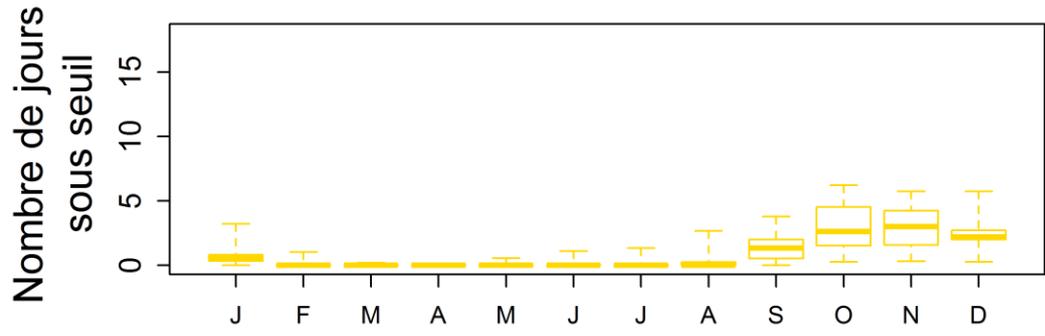
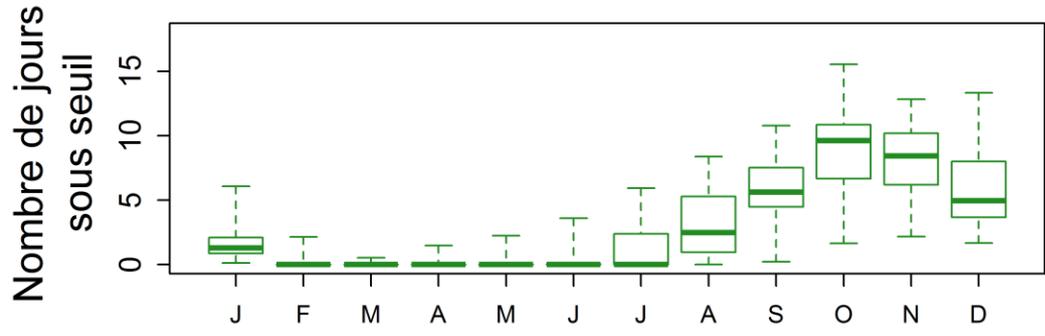
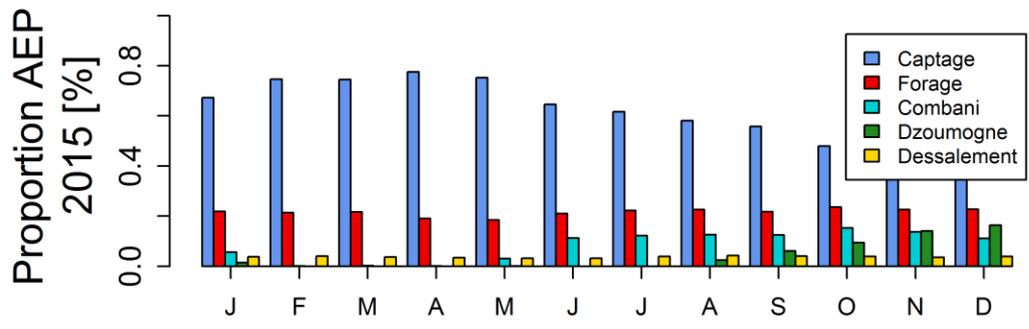


Figure 51 : Proportion des différentes sources de prélèvement par mois pour l'année 2015 et nombre de jours moyen pour chaque mois de l'année passés sous chaque seuil sur la période 1990-2015 (vigilance en vert, alerte en jaune, alerte renforcée en rouge et crise en noir)

D'un point de vue pratique, cela implique à la fois la mise en place de dispositifs techniques sur les stations permettant d'assurer ce débit minimum à l'aval en étiage, mais aussi la mise en place de dispositifs de mesure en continu, permettant de contrôler les volumes d'eau effectivement prélevables.

D'un point de vue fonctionnel, elle va mécaniquement induire des contraintes dans l'exploitation des stations de pompage en rivière, et donc ensuite dans le fonctionnement des unités de traitement. Comme le montrent les graphes d'analyse rétrospective de l'état des débits en fonction des différents seuils, l'application des seuils va engendrer des périodes où les prélèvements seront réduits. Ces réductions sont de niveaux variables en fonction des seuils et également de durées variables en fonction de la dynamique des bassins considérés.

La question essentielle est donc de voir quelles sont, par unité de production, les solutions de panachage des prélèvements (surface, souterrain, retenue) permettant de maintenir un niveau d'entrée aux unités de traitement qui soit compatible avec la demande en eau.

Les implications de l'application stricte des seuils doivent donc être analysées par station ou par groupe de stations.

La Figure 52 présente les distributions sous forme de boîte à moustache des taux de remplissage des retenues collinaires lorsqu'au moins une station concernée par l'unité de production dont dépend la retenue est en situation à risque (retenue de Dzoumogné et Combani pour l'UP de Bouyouni, retenue de Combani pour l'UP d'Ourovéni). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 0.01, 0.25, 0.5, 0.75 et 0.99% des distributions. Pour l'UP d'Ourovéni, pour chaque situation à risque le taux de remplissage de la retenue de Combani est très variable et diminue peu avec la gravité de l'étiage. Cela signifie qu'en situation de tension sur la ressource, la retenue peut jouer un rôle tampon pour la préservation de la ressource. Pour l'UP de Bouyouni, on observe un comportement différent sur les deux retenues collinaires. Si le comportement est similaire pour la retenue de Combani, ce qui est normal puisque les dates sont communes, pour la retenue de Dzoumogné, le taux de remplissage a tendance à diminuer avec la gravité de la situation, tout comme sa variabilité (jusqu'à 90% en situation de vigilance alors qu'on ne dépasse pas les 20% de remplissage en période de crise). La retenue de Dzoumogné ne permet pas de jouer de rôle tampon mais est représentative des tensions sur les ressources. La distribution du rapport entre le volume cumulé des retenues et le volume total maximum de ces retenues montre l'état des ressources disponibles dans les deux retenues pendant une situation à risque. Si le volume cumulé des retenues diminue en moyenne avec la gravité de la situation (XX en situation de vigilance, XX en alerte, XX en alerte renforcée et XX en crise), il ne passe pas en dessous de 18% de la capacité totale des retenues quelle que soit la situation. En période de crise, le volume cumulé des retenues ne dépasse pas 43% de la capacité totale, cela donne une indication du volume maximal encore dans les retenues lorsqu'on se situe en période de crise.

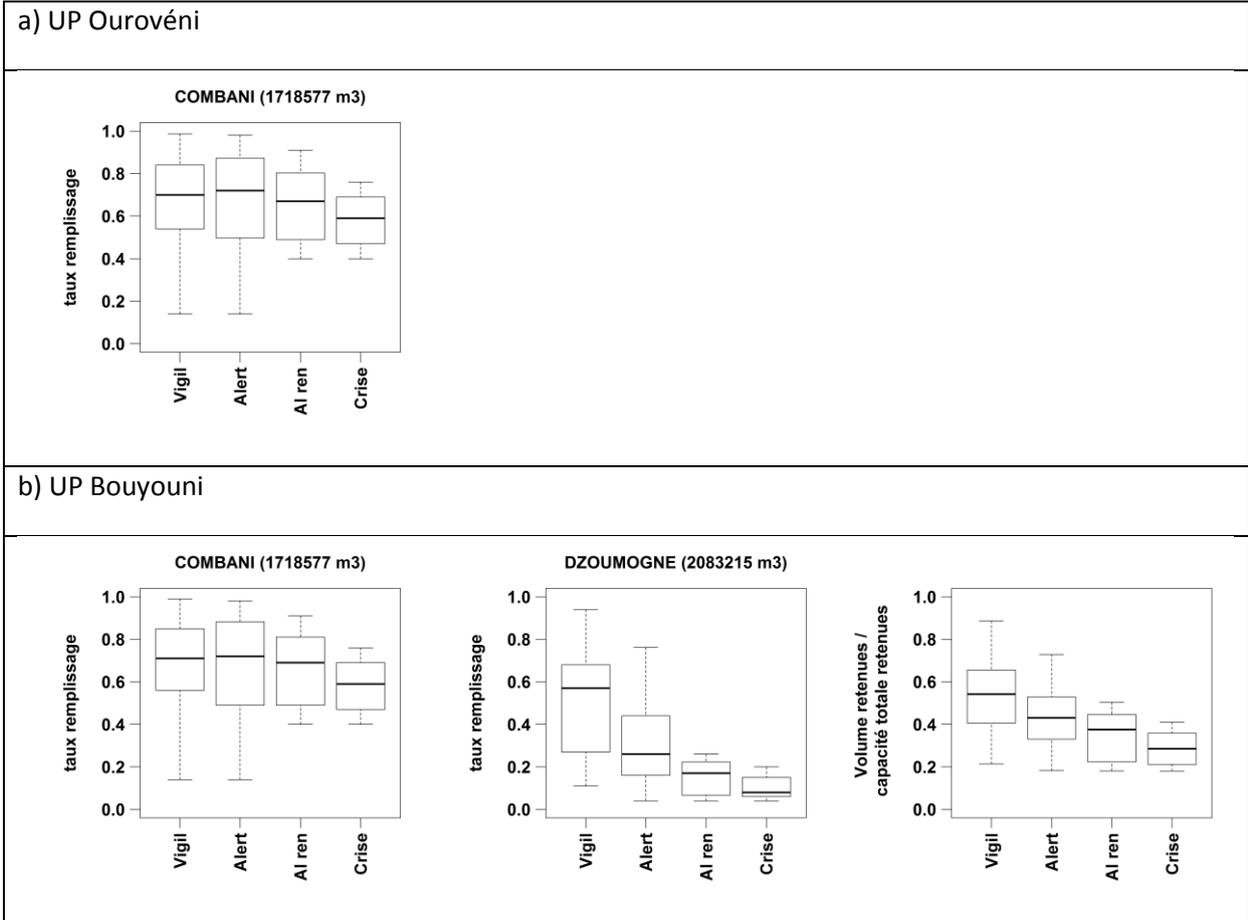


Figure 52 : Boîtes à moustache des taux de remplissage des retenues, lorsqu’une station au moins concernée par l’unité de production dont dépend la retenue est en situation à risque, et rapport entre les volumes cumulés des retenues et le volume total maximum.

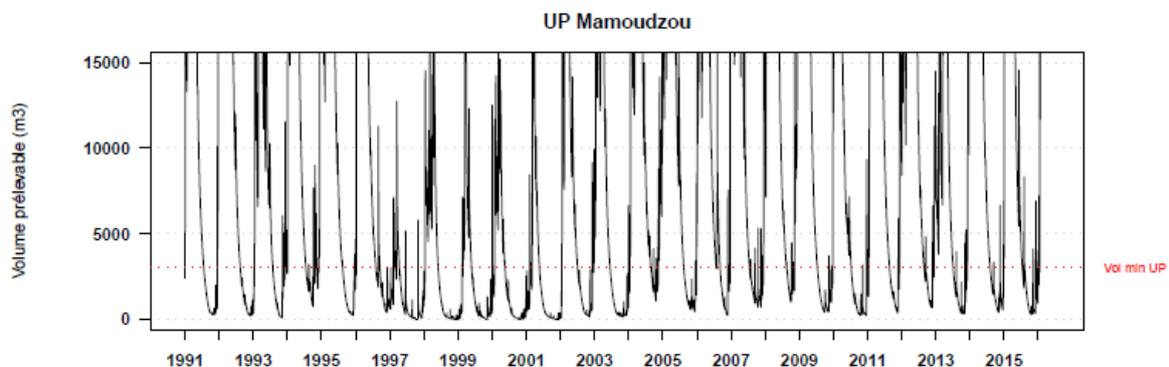
5.4 Analyse des conséquences de la mise en place des seuils

Mettre en place des règles de gestion voire un système complet de gestion va au-delà du périmètre de la présente étude. Un tel système doit permettre de prioriser les points de prélèvements en fonction des contraintes pesant sur le système, et si possible en ayant une vision prévisionnelle des apports. Par ailleurs, le manque d’éléments quantitatifs sur les prélèvements hors AEP (notamment la méconnaissance des prélèvements agricoles) est un frein important pour l’analyse quantitative de la mise en place des seuils.

Nous proposons ici de fournir des indicateurs statistiques de tension sur la ressource en fonction du seuil de débit réservé estimé au droit des stations. Il s’agira d’évaluer la criticité de certaines situations, permettant de mieux évaluer les difficultés de mise en place de ces seuils. Cette analyse est faite rétrospectivement sur la base des simulations disponibles sur les différentes stations. Ces longues séries permettent de regrouper une grande variété de situations d’été.

La Figure 53 présente le cumul des volumes prélevables en rivière au niveau des captages pour les trois unités de production concernées par les stations. Pour chaque UP, les volumes prélevables sont déterminés en considérant la somme de la part de débit pour chaque captage au-dessus d’un seuil de débit (module/10 simulé). Ce volume peut être comparé au volume minimum qui doit être fourni à la station de traitement pour identifier les périodes de tension sur la ressource. Le volume

prélevable inférieur au seuil signifierait des problèmes pour le bon fonctionnement des stations de traitement. Les volumes de ou des retenues concernées pour chaque UP sont également représentés, ainsi que les volumes déficitaires cumulés jusqu'au jour où le minimum dans la retenue est atteint pour l'année hydrologique (en points rouges). Pour l'UP de Mamoudzou, le volume minimum est de l'ordre de 3000 m³/j. Trois captages alimentent la station de traitement, ainsi que 3 forages. Les périodes de tension sont récurrentes et apparaissent chaque année, avec différents degrés de gravité. L'apport au niveau de la station de traitement des prélèvements par forage permet probablement de palier ce déficit au niveau des captages, la connaissance fine des prélèvements des forages permettrait de confirmer cette hypothèse. Pour l'UP d'Ourovéni, le volume minimum est de l'ordre de 10000 m³/j. Trois captages sont concernés ainsi que la retenue de Combani. Là aussi les tensions sont récurrentes et apparaissent chaque année avec différents degrés de gravité. L'année 1997 ressort particulièrement bien. La mise en relation des volumes prélevables et des volumes dans les retenues montre également des tensions pour les années 2001, 2007, 2010 et 2015. Les volumes déficitaires cumulés (points rouges) jusqu'à la date où la retenue est à son minimum sont assez importants comparativement au volume restant dans les retenues. Ceci est à nuancer dans la mesure où la diminution de volume dans la retenue est liée à la compensation de ces volumes déficitaires. Pour l'UP de Bouyouni, le volume minimum est de l'ordre de 10000 m³/j. Cinq stations ainsi que les deux retenues sont concernées. L'UP de Bouyouni est moins impactée, les périodes de tension sont moins récurrentes et n'apparaissent pas tous les ans. La présence d'un plus grand nombre de captages et la non-concomitance des périodes critiques sur l'ensemble des stations de manière simultanée semble permettre d'assurer le volume minimum nécessaire à l'usine de traitement. Ces volumes déficitaires sont relativement faibles au regard du volume total dans les deux retenues (rappelons que la retenue de Combani permet également d'alimenter l'usine de traitement de l'UP de Bouyouni).



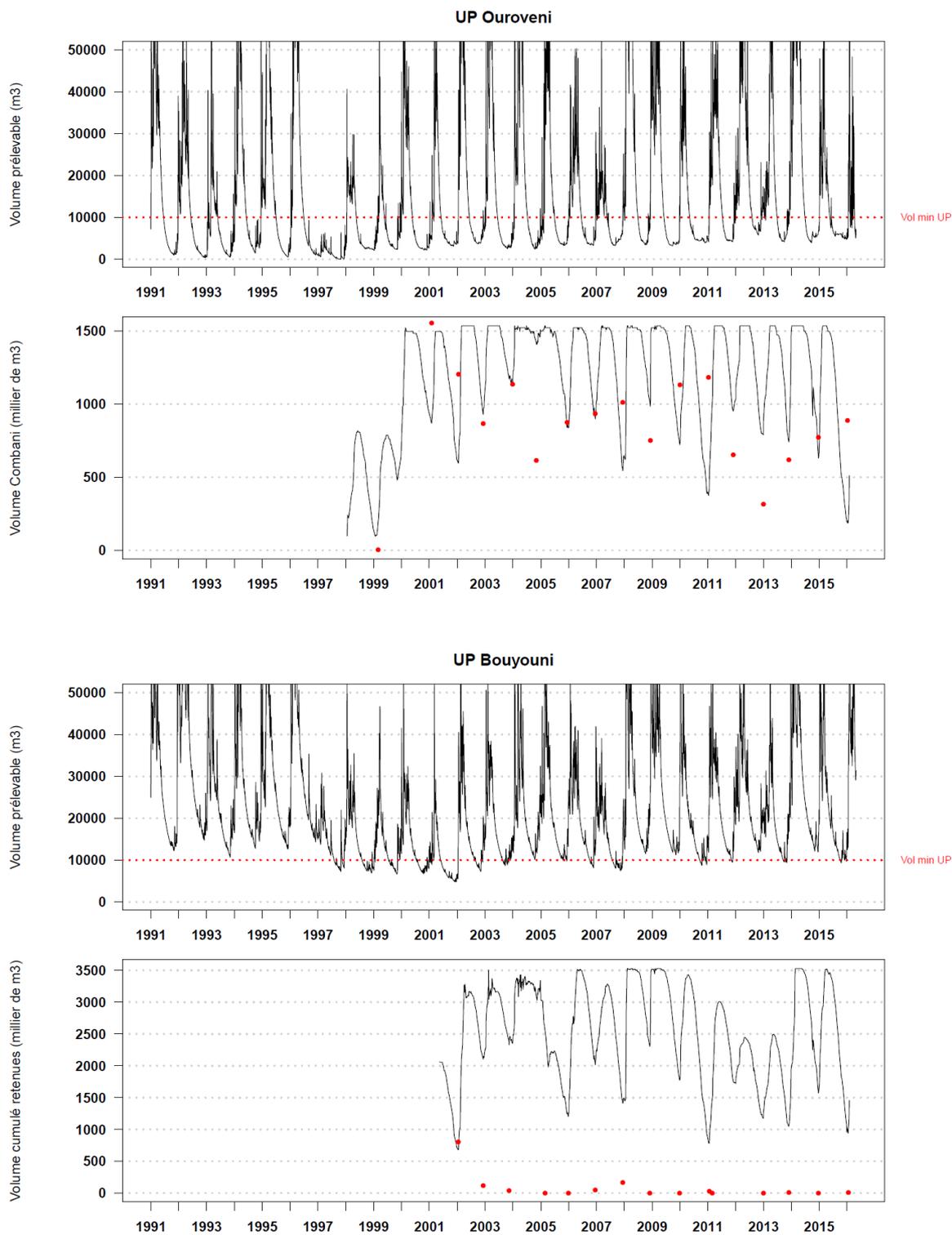


Figure 53 : Volumes prélevables cumulés dans les captages pour les UP de Mamoudzou, Bouyouni et Oouroveni, au regard des volumes de ou des retenues concernées par l'UP. Les volumes prélevables ont été déterminés en considérant le débit supérieur à un débit minimum en rivière égal au module/10 simulé pour chaque station.

6 Conclusion et perspectives

L'estimation des seuils a reposé sur une importante base de données hydroclimatiques (débit, pluie, évapotranspiration potentielle (ETP)) disponible au moment de l'étude. Les travaux de modélisation réalisés pour simuler les débits font apparaître des sources d'amélioration potentielle, et des analyses complémentaires pourraient être utiles pour affiner la mise en place des seuils. Les difficultés de gestion de ces dernières années, liées davantage à l'augmentation forte de la demande en eau (qui risque de continuer dans les années à venir) qu'à la criticité des situations hydrométéorologiques, montrent la nécessité de réaliser une analyse globale sur la complémentarité des différentes sources d'approvisionnement et leur gestion combinée. Il pourrait être nécessaire d'explorer des sources d'approvisionnement supplémentaires par rapport à celles existantes si cette analyse révélait une fiabilité trop faible du système de fourniture d'eau. S'il est difficile de quantifier les conséquences de la mise en place de seuils sécheresse avec les connaissances actuelles dont nous disposons, ceux-ci ne permettront sans doute pas de palier toutes ces difficultés.

Dans ce contexte, les objectifs d'une étude d'actualisation des seuils seraient les suivants :

- prendre en compte les avancées techniques liées au modèle à maille fine arôme de Météo-France, dans les travaux de spatialisation des pluies, ainsi que de séries de débit continues issues des stations de mesures hydrométriques en cours d'installation par la DEAL. Ceci permettrait d'améliorer la modélisation des débits et de mieux reproduire les périodes d'étiage ;
- analyser de manière détaillée la sensibilité des seuils estimés à diverses sources d'incertitude, notamment l'ETP : données de vent disponible sur Pamandzi sur une longue série, données sur Coconi à partir de l'été 2016 et en début 2017 sur Longoni puis Dapani fin 2017
- faire un retour d'expérience sur l'utilisation des seuils fin 2016, discuter des éventuelles difficultés de mise en œuvre et proposer des possibilités d'évolution, au regard également des évolutions de la demande en eau ;
- accompagner la réflexion sur les différentes possibilités de gestion et de panachage des différentes ressources en eau
- réaliser des tests préliminaires d'évaluation des potentialités d'anticipation des seuils sur la base de modèles hydrologiques de prévision, en utilisant la climatologie (l'utilisation de prévisions à moyenne échéance ou saisonnière ? produite par Météo-France pourrait faire l'objet d'une étude à part entière) ;

Une telle étude permettrait par ailleurs d'affiner les connaissances de l'hydrologie des cours d'eau de Mayotte.

7 Bibliographie

- Andréassian, V., Bourgin, F., Oudin, L., Mathevet, T., Perrin, C., Lerat, J., Coron, L. and Berthet, L.: Seeking genericity in the selection of parameter sets: Impact on hydrological model efficiency, *Water Resour. Res.*, n/a–n/a, doi:10.1002/2013WR014761, 2014.
- ANTEA (2003), Etude du bassin versant du Mro Oua Bouyouni, DAF.
- ANTEA (2012), Etude pour la détermination des volumes prélevables sur les cours d'eau de Mayotte et état des lieux exhaustif des prélèvements agricoles, rapport n° 67587/A.
- Dirks, K. N., J. E. Hay, C. D. Stow, et D. Harris (1998), High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data, *Journal of Hydrology*, 208(3-4), 187-193, doi: 10.1016/s0022-1694(98)00155-3.
- Edijatno, N. D. Nascimento, X. L. Yang, Z. Makhlof, et C. Michel (1999), GR3J: a daily watershed model with three free parameters, *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 44(2), 263-277, doi: 10.1080/02626669909492221.
- Lapègue, J. (1999), Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : la ressource hydrique - l'assainissement pluvial et l'érosion, PhD thesis, 376 pp, Université de la Réunion.
- Lebecherel, L. (2015), Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique, PhD thesis, 280 pp, AgroParisTech - Irstea (Antony).
- Lindström, G. (1997), A Simple Automatic Calibration Routine for the HBV Model, *Hydrology Research*, 28(3), 153-168.
- Ly, S., C. Charles, et A. Degre (2011), Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(7), 2259-2274, doi: 10.5194/hess-15-2259-2011.
- Mathevet, T. (2005), Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants, PhD thesis, 463 pp, ENGREF, Paris.
- Nash, J. E., et J. V. Sutcliffe (1970), River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nicolle, P., C. Perrin, et V. Andréassian (2014), Redéfinition des seuils sécheresses à la Réunion. Rapport final d'étude, 79 pp, Irstea, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la Réunion, ONEMA.
- Otieno, H., J. X. Yang, W. W. Liu, et D. W. Han (2014), Influence of Rain Gauge Density on Interpolation Method Selection, *J. Hydrol. Eng.*, 19(11), doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000964.
- Oudin, L., V. Andréassian, T. Mathevet, C. Perrin, et C. Michel (2006), Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations, *Water Resources Research*, 42(7), W07410, doi: 10.1029/2005WR004636.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil, et C. Loumagne (2005), Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling, *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- Perrin, C., C. Michel, et V. Andréassian (2003), Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289, doi: 10.1016/s0022-1694(03)00225-7.
- Petit, V., R. Coulomb, et M. Parizot (2014), Établissement de valeurs seuils sécheresse pour les eaux souterraines du département de Mayotte. Rapport BRGM/RP-62831-FR, 19 p., 13 fig., 12 ann pp.

- Ruelland, D., S. Ardoin-Bardin, G. Billen, et E. Servat (2008), Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa, *Journal of Hydrology*, 361(1-2), 96-117, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.049.
- Stollsteiner, P., et C. Cluzet (2008), Actualisation des propositions pour une méthodologie relative aux études hydrauliques et hydrologiques à Mayotte. Rapport BRGM/RP-56881-FR, 98 p., 32 ill., 94 ann pp.
- Stucky (2004a), Etude des bassins versants des rivières Coconi et Kwalé et d'un programme d'amélioration des connaissances hydrologiques. Rapport d'étude Phase 1, Bassin versant de la Coconi, 48 p + Ann pp, Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte.
- Stucky (2004b), Etude des bassins versants des rivières Coconi et Kwalé et d'un programme d'amélioration des connaissances hydrologiques. Rapport d'étude Phase 1, Bassin versant de la Kwalé, 48 p + Ann pp, Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte.

Annexe 1 Critique des données de débit

			BdD Access (Barême)		BdD Excel
Nom	Code	Cours d'eau	Relation hauteur-débit	Caractéristique station	Cohérence avec BdD Access
APANDZO	30543010	Mro oua Coconi		Prise d'eau juste en amont. Jaugeage en aval depuis 01/2016.	Cohérence avec BdD Access
BANDRAZIA	30461610	Mroni Béja	Aucune donnée		Pas de point de comparaison
BATRINI	30472010	Mroni Batrini		Jaugeage à 20 m en aval du seuil à partir de décembre 2012 (avant au seuil) + Fuites sous le seuil	Non cohérence avec BdD Access
BOUNGOUMOU HÉ	30458410	Mroni Bounougoumouhé	Changement débit de base après novembre 2012*	Jaugeage sur le seuil jusqu'en novembre 2012, à l'amont du seuil ensuite	Cohérence avec BdD Access
BOUYOUNI BAS	30356410	Mro oua Bouyouni		Station où échelle limnimétrique nivelée. Station de bonne qualité	Non cohérence avec BdD Access
BOUYOUNI HAUT	30351410	Mro oua Bouyouni	Changement relation Q/H après novembre 2012	Jaugeages pas au même endroit en étiage (en amont du seuil)	Non cohérence avec BdD Access
DEMBENI BAS	30921020	Mro oua Dembeni		Station pas mal, mais courbe de tarage plate en étiage	Cohérence avec BdD Access
DEMBENI HAUT	30921010	Mro oua Dembeni		Pas de jaugeage après 2014, piste trop défoncée	Cohérence avec BdD Access
DZOUMOGNÉ OUEST	30333320	Mro oua Mjihari	2 valeurs de débit		Pas de point de comparaison
DZOUMOGNÉ RETENUE	30330220	Mro oua Tanabé		Station en aval de la retenue - Débit plus ou moins contrôlé - Sur seuil jusqu'en nov 2012, 50m en aval du seuil depuis	Cohérence avec BdD Access
GOULOUE	30131410	Mro oua Gouloué	Aucune donnée	Ancienne station déplacée à Passamainty	Pas de point de comparaison
KWALÉ HAUT	30143010	Mro oua Kwalé	Aucune donnée		Pas de point de comparaison

KWALÉ STATION	30147210	Mro oua Kwalé	RAS	Courbe de tarrage plate car mesure sur un seuil étroit (Grande variation de hauteur -> petite variation de débit) ; Captage souterrain à proximité	Cohérence avec BdD Access
LONGONI	30361810	Mro oua Longoni	Changement débit de base après novembre 2012*	Hauteur sur seuil, avant nov 2012, jaugeage sur seuil même si pas assez d'eau	Changement de pratique à partir de nov2012. Données douteuses.
MAPOUÉRA	30333310	Mro oua Mapouéra	RAS	Station assez stable, pas de changement de pratique de jaugeage	Aucune donnée
MERESSE	30356810	Mro oua Meresse	RAS		Cohérence avec BdD Access
M'GOMBANI	30211210	Mro oua Mgombani	Changement débit de base après novembre 2012*	Mesure sur seuil jusqu'en nov 2012, 40m en aval du seuil depuis	Changement de pratique à partir de nov2012. Données douteuses.
MOHOGONI	30334510	Mro oua Mouhogoni	RAS		Non cohérence avec BdD Access
M'ROALÉ	30522010	Mrowalé	RAS	Hauteur sur seuil mais pompage au niveau du seuil - Sur seuil quand pompes à l'arrêt. Sinon à 20m en amont du seuil (section à aménager)	Cohérence avec BdD Access
M'RONABEJA	30733310	Mroni Antanana	RAS	Courbe de tarage peu fiable - Station en aval de la confluence : BV mal délimité ; Mesure sur le seuil pour hauteur <4cm et en aval sinon	Comparaison délicate (trop peu de données dans la BdD Access)
M'TSANGAMO UJI	30448810	Mroni Andrianabé	Aucune donnée		Cohérence avec BdD Access
MWALA	30530210	Mroni Mouala	RAS	Courbe de tarage pas mal, station semble fiable	Cohérence avec BdD Access (sauf janvier 2008 : 12m3/s)
OUROVENI PONT	30533110	Mro oua Ouroveni	RAS	Station pas forcément bonne (tarage pas terrible) - Sous le pont ou section à aménager à 20m en amont du pont	Aucune donnée
OUROVENI	30530220	Mro oua Ouroveni	Aucune donnée		Suspicion août 2002 et

STATION					suivant
PASSAMAINTY	30139110	Mro oua Gouloué	Changement débit de base après novembre 2012*	Beaucoup de blocs, section difficilement définissable, débit imprécis	Aucune donnée
SOULOU	30512210	Mro oua Chirini	Changement débit de base après novembre 2012*	Changement de pratique depuis novembre 2012 : plus de jaugeage sur le seuil	Changement de pratique à partir de nov2012. Données douteuses.
SALIM BÉ	30943210	M'ro oua Hajangua	2 valeurs de débit	Embâcles: jaugeages parfois difficiles	Aucune donnée
BE DAPANI	30742610	M'ro oua Dapani	2 valeurs de débit		Aucune donnée

* Formation hydrométrie par la DREAL Centre Val de Loire

Annexe 2 Recensement des prélèvements agricoles

Le Tableau 17 récapitule les stations disponibles et les prélèvements agricoles, recensés par SOGREAH (*Définition des débits de référence pour les rivières de Mayotte – Etude des QMNA5 (Etiages)*, SOGREAH, 2008).

Tableau 17 : Recensement des prélèvements agricoles connus aux stations hydrométriques de l'étude Définition des débits de référence pour les rivières de Mayotte (issu de SOGREAH, 2008). Les stations surlignées correspondent aux stations jugées non ou faiblement influencées par des prélèvements AEP ou agricoles, compte tenu de leur situation vis-à-vis des prises d'eau AEP ou des soutiens d'étiage par transfert des retenues

CODE	NOM	RIVIERE	SITUATION	Prélèvements agricoles connus (l/s)	
G2	Apandzo	Mro oua Coconi		0.17	hors d'usage
G9	Brandazia	Mroni Béja		+	1 inconnu 1 hors d'usage et 4 projets
G8	Batrini	Mroni Batrini		+	1 projet
G10	Boungoumouhé	Mroni Boungoumouhé		+	1 hors d'usage et 1 inconnu
A5	Bouyouni bas	Mro oua Bouyouni	Amont de la prise d'eau AEP	0.69	1 inconnu
A5H	Bouyouni haut	Mro oua Bouyouni	Amont de la prise d'eau AEP	0.23	3 inconnus et 3 projets
C7	Dembéni bas	Mro oua Dembeni	Amont de l'ancienne prise d'eau	+	1 inconnu
C7H	Dembéni haut	Mro oua Dembeni	Amont de l'ancienne prise d'eau	+	1 projet
A2W	Dzoumogné ouest	Mro oua Mjihari	Amont de la prise d'eau AEP de Dzoumogné ouest	0.38	2 inconnus
A2R	Dzoumogné retenue	Mro oua Tanabé	Aval retenue de Dzoumogné - débit influencé	0.29	
C3	Gouloué	Mro oua Gouloué		-	
C4H	Kwalé haut	Mro oua Kwalé	Amont de la prise d'eau AEP	-	
C4S	Kwalé station	Mro oua Kwalé	Amont de la prise d'eau AEP de Kwalé	0.14	
A9	Longoni	Mro oua Longoni	Amont de la prise d'eau AEP	0.05	
B2	M'gombani	Mro oua M'gombani		-	
E5	M'ronabéja	Mroni Antanana			Hors fond de carte
G12H	M'tsangamouji	Mroni Andrianabé	Aval de la prise d'eau AEP de M'tsangamouji haut	-	

A2H	Mapouéra	Mro oua Mapouéra	Dérivation vers la retenue de Dzoumogné	-	
A4	Méresse	Mro oua Méresse	Amont de la prise d'eau AEP	0.07	
G6	Mroalé	Mrowalé	Amont de la prise d'eau AEP	+	1 inconnu; 7 projets et 3 hors d'usage
A2M	Mohogoni	Mro oua Mouhogoni	Amont de la prise d'eau AEP	0.65	
G5M	Mwala	Mroni Mouala	Cours d'eau alimentant la retenue de Combani	0.07	dont 1 hors d'usage
G5	Ourovéni	Mro oua Ourovéni	Station située depuis 2004 en aval de la prise d'eau AEP	5.48	dont 3 hors d'usage + 10 inconnus et 5 projets
G7	Soulou			+	1 inconnu

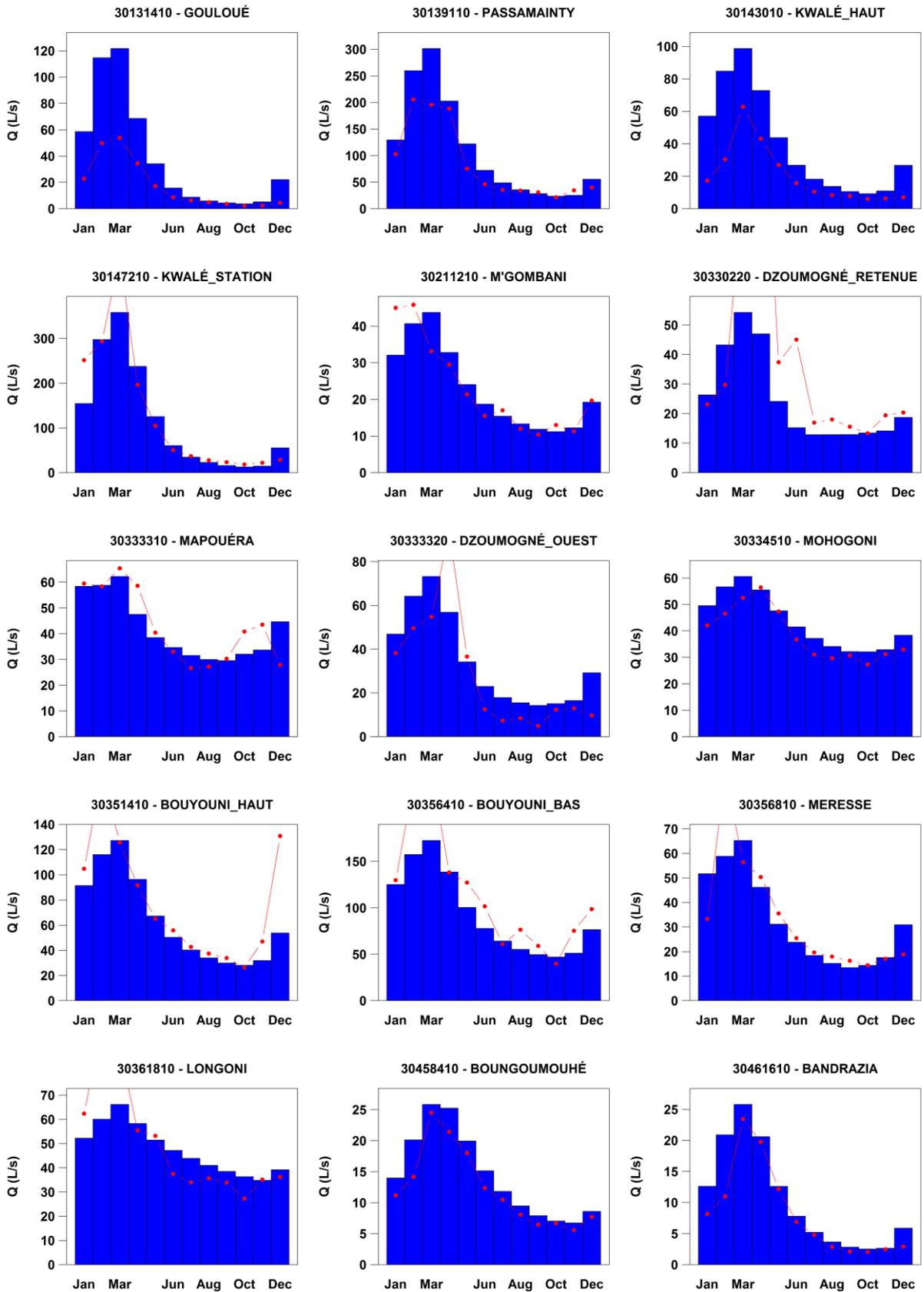
SOGREAH a réalisé l'analyse des influences connues pour chacune des stations. Elles sont reprises telles quelles dans le Tableau 18 :

Tableau 18 : Analyse des influences connues aux stations hydrométriques de l'étude Définition des débits de référence pour les rivières de Mayotte (issu de SOGREAH, 2008)

NOM	Analyse
APANDZO	Cette station n'est plus suivie. Les jaugeages effectués ne concernent qu'un seul des deux bras. Ils sont donc inexploitable car non représentatifs de la rivière.
BRANDAZIA – BATRINI – BOUNGOUMOUHE	Ces stations sont utilisables mais pas nécessairement à jour. Elles sont destinées à disparaître car il n'y a pas d'enjeu à proximité mais elles présentent en revanche des risques par rapport aux crues. Leur intérêt réside dans la mesure des débits d'étiages. En ce qui concerne Batrini, du fait du faible débit, il existe une forte imprécision sur les mesures.
BOUYOUNI HAUT ET BAS	Les débits sont soutenus par le biais de la retenue de Combani. Ces stations sont donc inutilisables.
DEMBENI HAUT ET BAS	Plusieurs prélèvements agricoles existent qui rendent ces stations inexploitable, en particulier des prélèvements du SIRAD dont les débits restent inconnus.
DZOUMOGNE OUEST ET RETENUE	Ces stations sont situées en aval de la retenue de Dzoumogné. Les débits y sont donc fortement influencés (réduits) du fait du stockage dans la retenue.
GOULOUE	La station est située en amont d'une prise AEP et il n'y a pas de prélèvement agricole recensé.
KWALE HAUT ET STATION	La station de Kwalé haut n'est pas sous l'effet de prélèvement recensé (le prélèvement est en aval). En revanche, celle de Kwalé station est située en aval des prélèvements de Kwalé haut et Kwalé clapet dont on ne connaît pas les débits prélevés ; elle est donc inexploitable.
LONGONI	Les prélèvements agricoles recensés sont a priori de faible valeur en débit moyen journalier (0,05 l/s) comparé au débit QMNA5 prévisible (de l'ordre de

	7 l/s), soit environ 1%.
M'GOMBANI	Les jaugeages ne sont pas fiables car la prise d'eau est régulièrement obstruée par des cailloux afin de relever le niveau pour faciliter le lavage du linge.
M'RONABEJA	Il y aurait des captages agricoles depuis 2007 mais cette information ne figure pas dans les données fournies. Nous ne disposons que de 4 années de données et les valeurs montrent qu'il y a des à sec. Cette station est donc inexploitable.
M'TSANGAMOUI	Cette station est en aval d'un captage AEP donc inexploitable.
MAPOUERA	Il n'y a pas de données pour cette station.
MERESSE	La station est située en amont des captages AEP. Les prélèvements agricoles recensés sont a priori de faible valeur en débit moyen journalier (0,07 l/s) comparé au débit QMNA5 prévisible (de l'ordre de 3 à 5 l/s), soit environ 1,5 à 3 %.
MROALE	La station est située en amont des captages AEP. Un seul captage agricole est recensé mais dont le débit est inconnu. Il est vraisemblablement faible comparé au QMNA5 probable (7 à 8 l/s).
MOHOGONI	La station est située en amont des captages AEP. Les prélèvements agricoles recensés sont relativement importants (0,65 l/s) mais la valeur du QMNA5 est de l'ordre de 13 l/s ce qui correspond à un prélèvement de 5% donc faible en relatif.
MWALA	Il y a un prélèvement agricole de débit moyen journalier de 0,07 l/s soit très faible (1 à 2% du QMNA5).
OUROVENI	Cette station est en aval de la prise d'eau AEP et de prélèvements agricoles importants (5,5 l/s en moyenne). Son débit est par ailleurs soutenu par la retenue de Combani. Elle est donc inexploitable.
SOULOU	Il y a un prélèvement agricole recensé, de débit inconnu. Il est vraisemblablement faible comparé au QMNA5 (13 l/s).

Annexe 3 Graphiques stations par stations



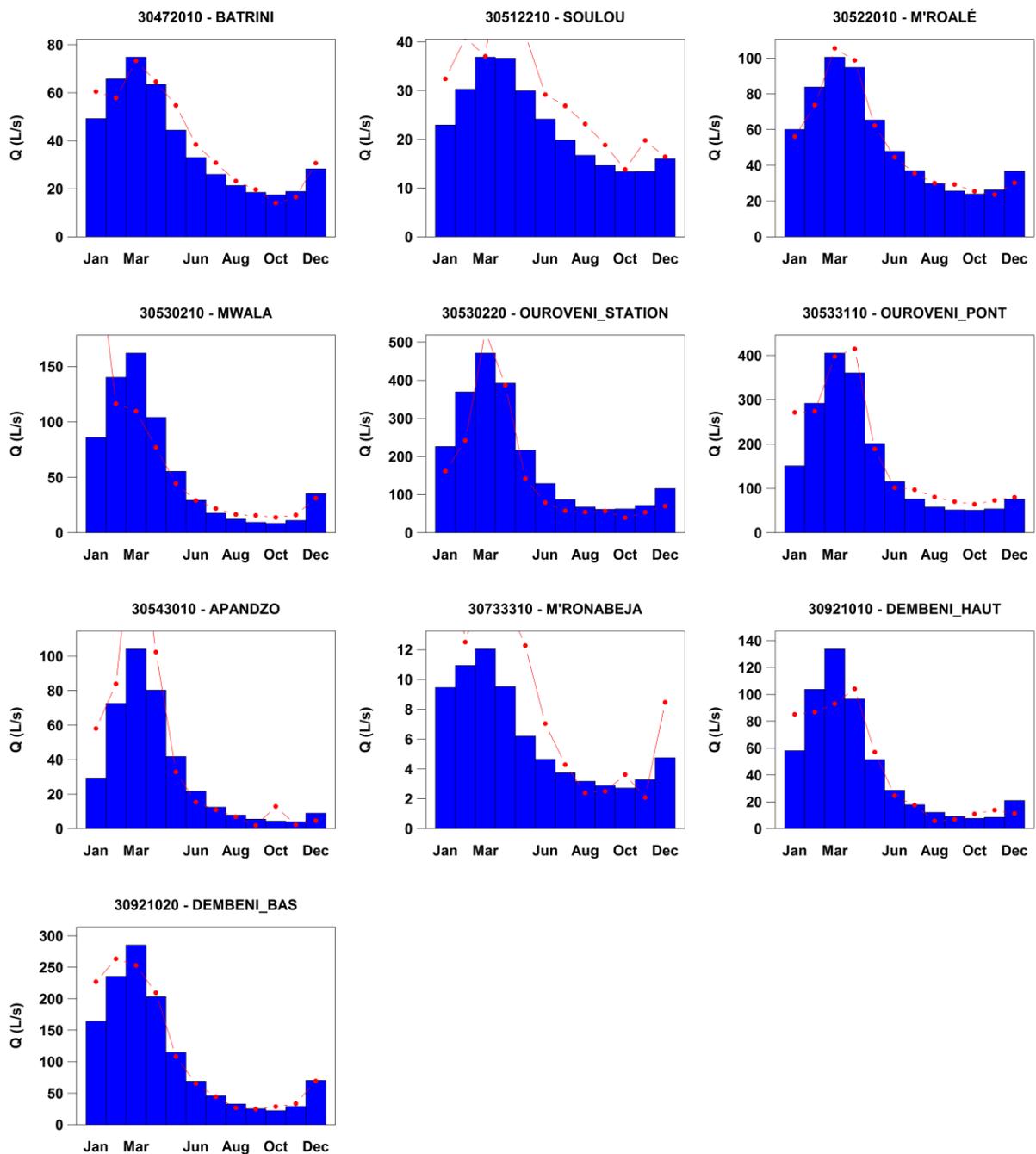
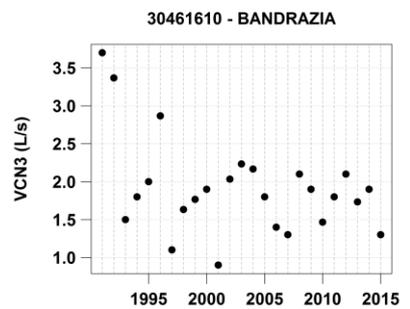
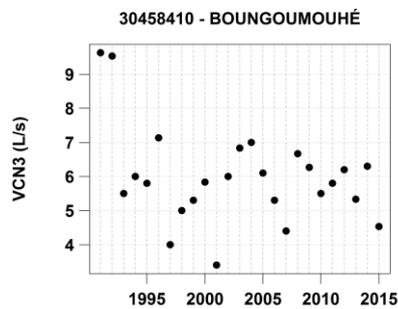
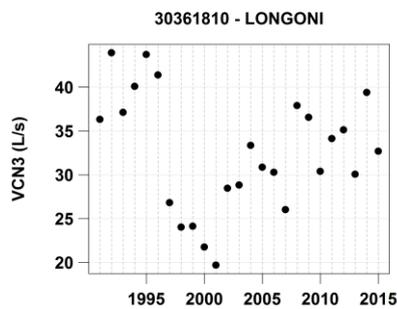
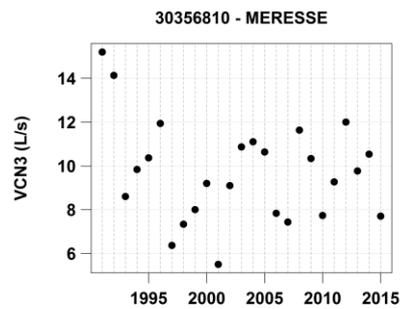
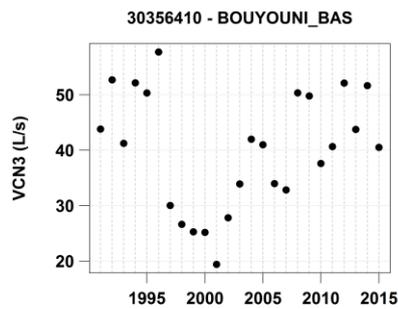
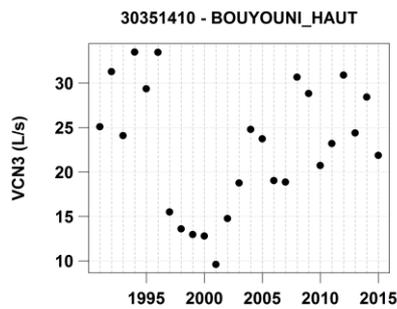
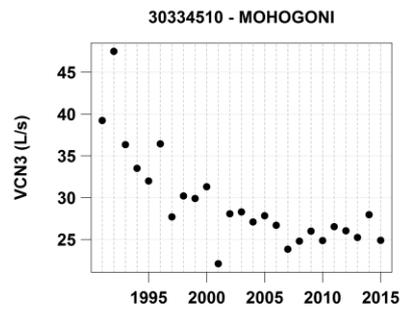
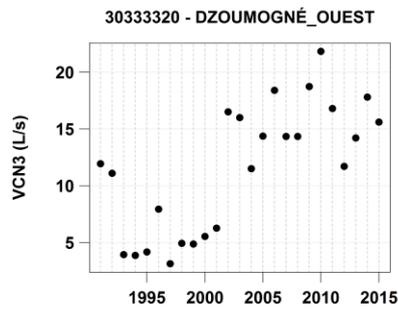
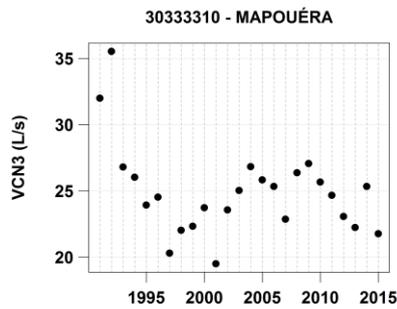
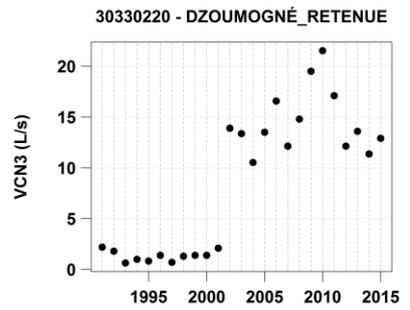
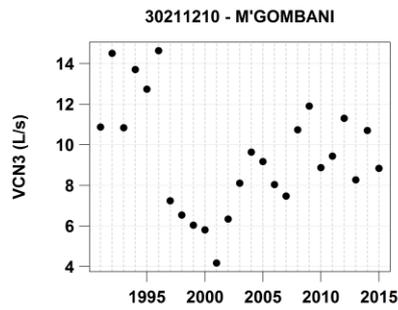
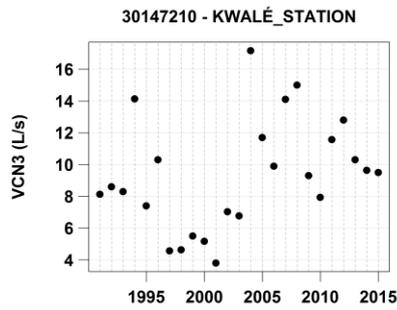
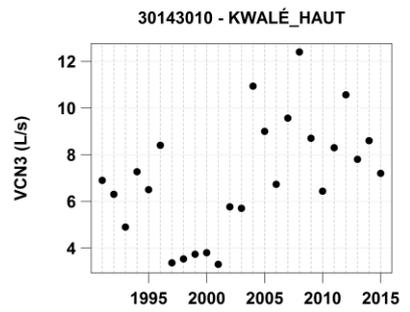
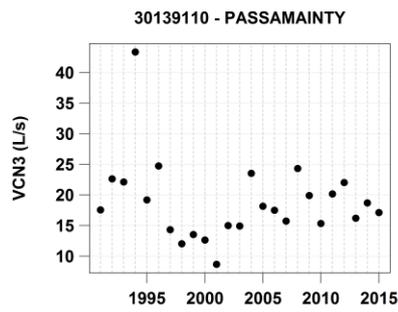
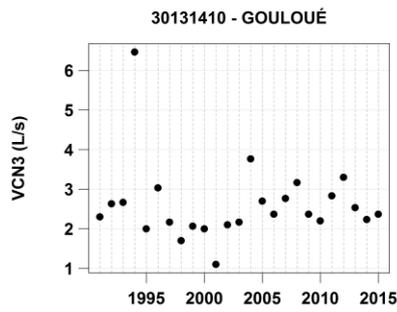


Figure 54 : Régimes mensuels de débits simulés (histogrammes bleus) et calculés à partir des données observées (rouge) pour l'ensemble des stations



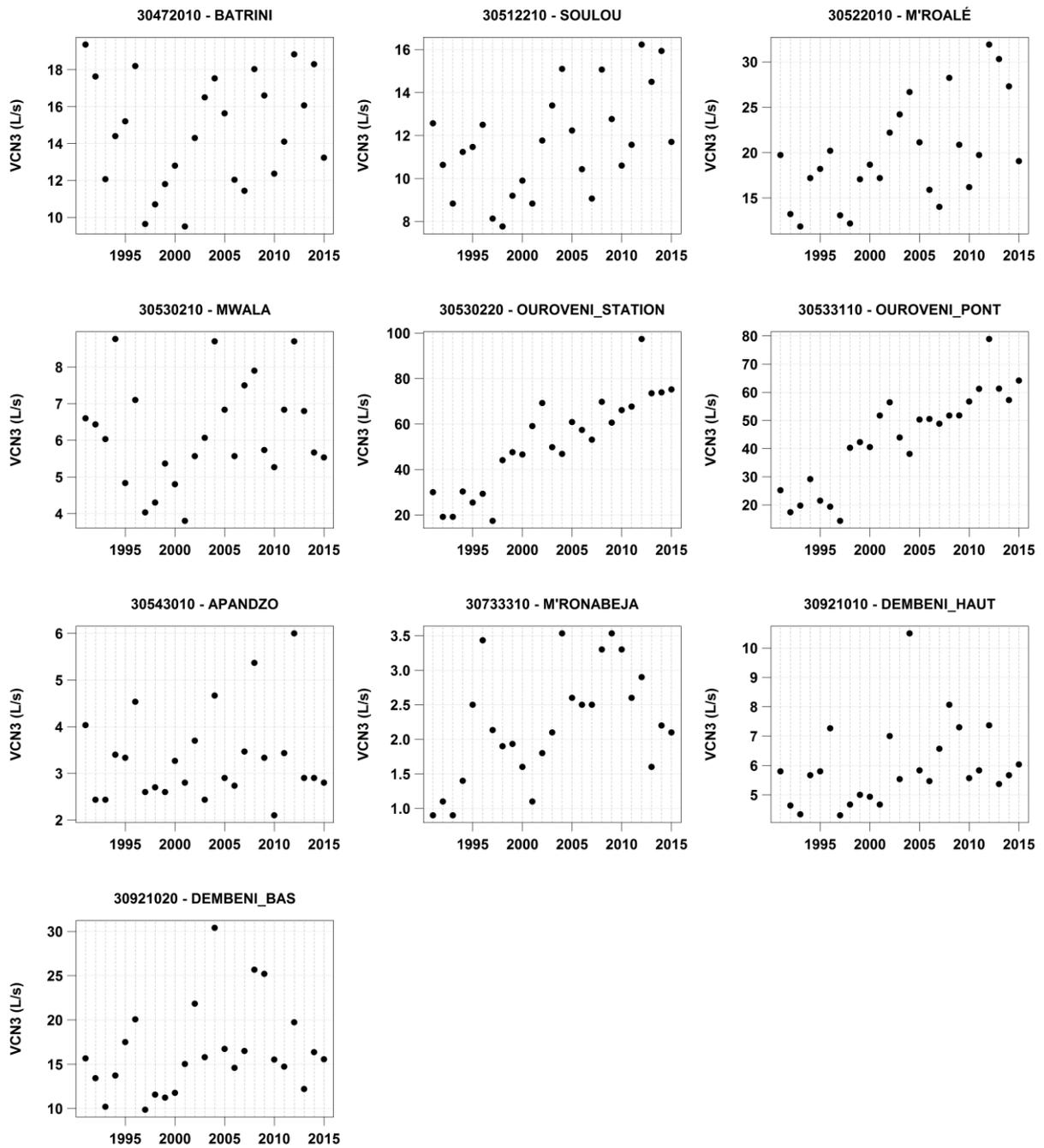
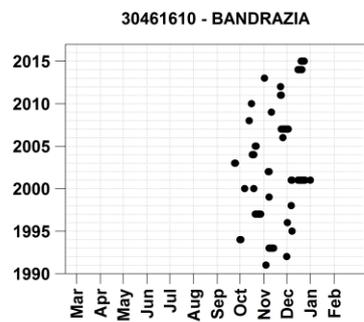
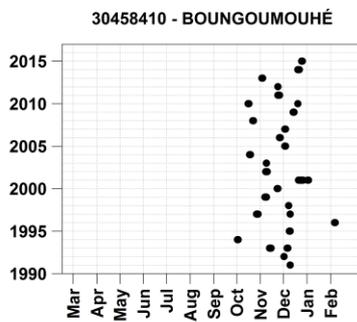
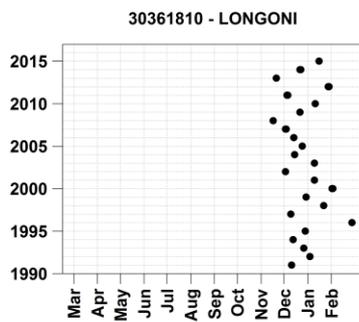
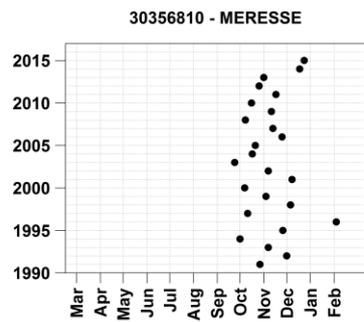
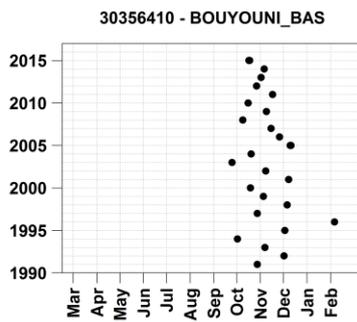
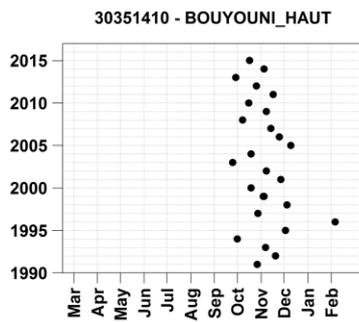
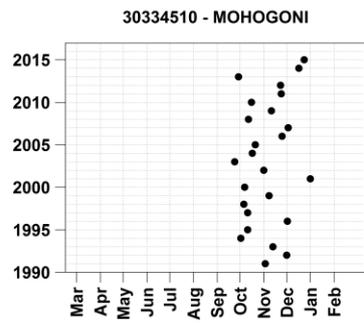
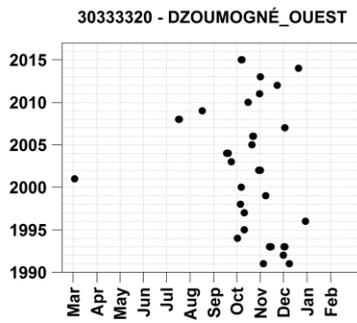
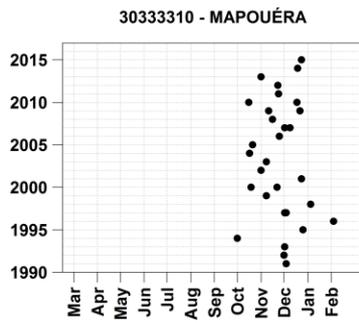
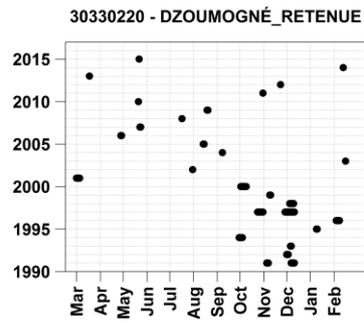
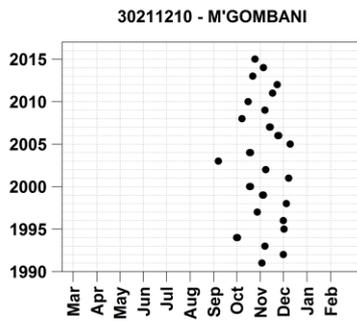
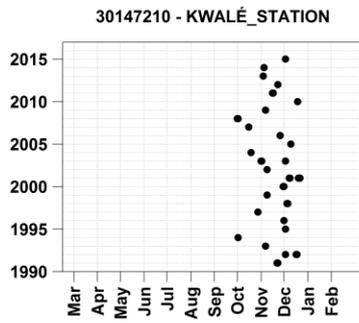
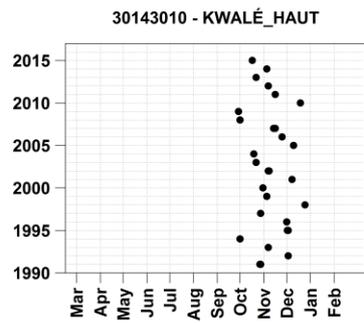
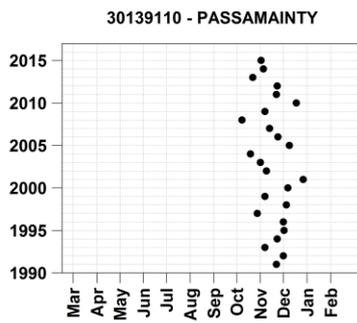
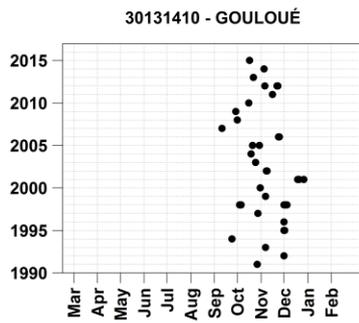


Figure 55 : VCN3 pour chaque année pour l'ensemble des stations



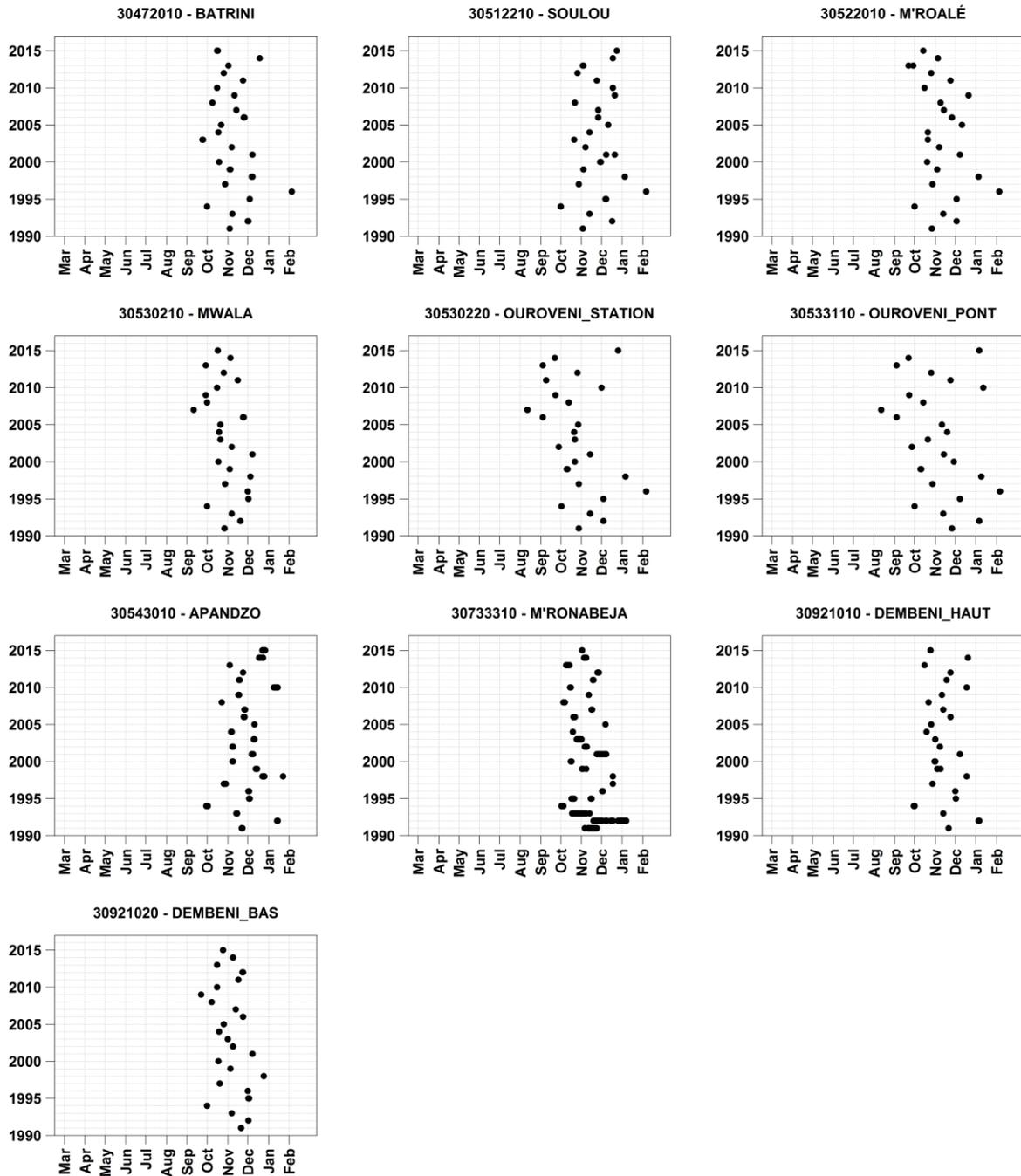
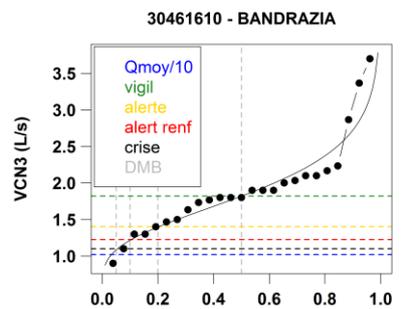
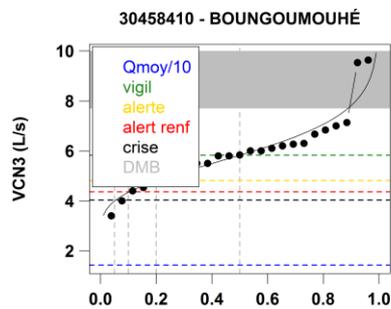
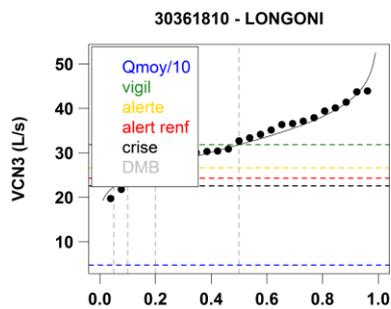
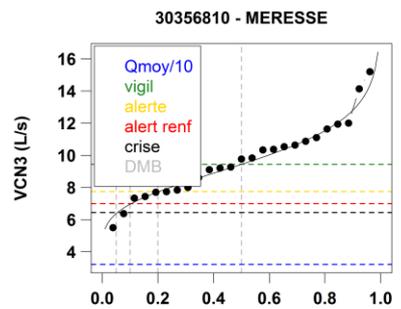
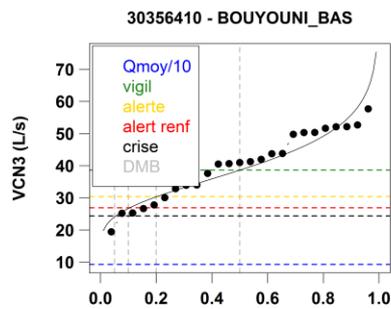
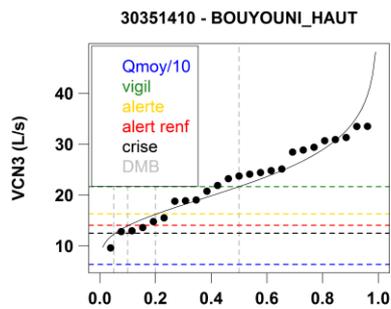
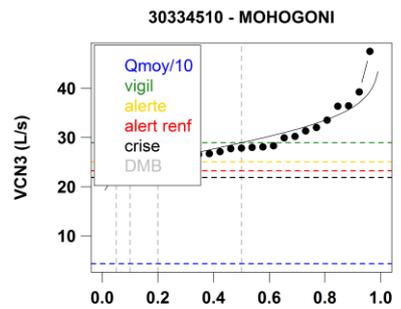
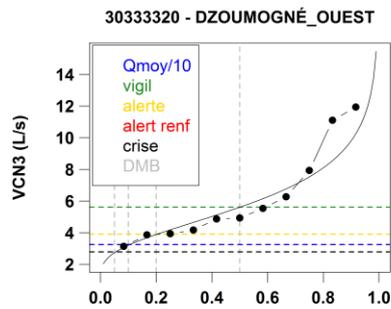
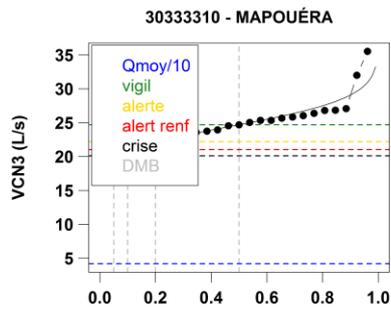
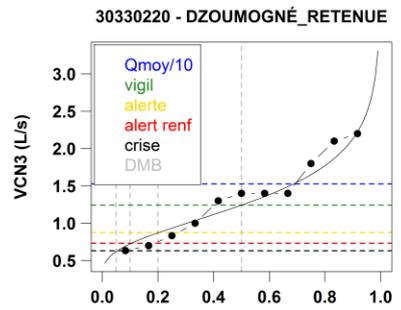
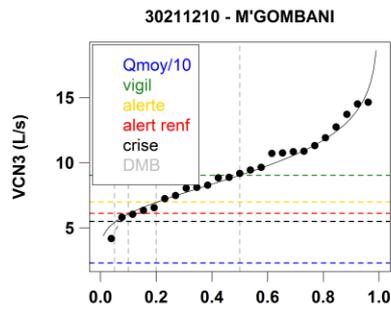
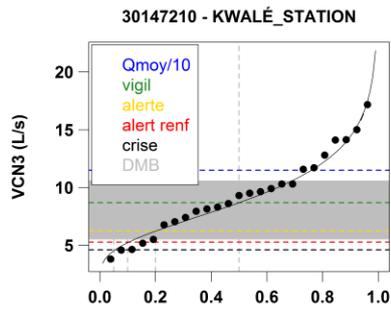
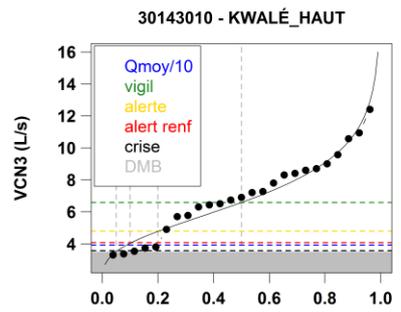
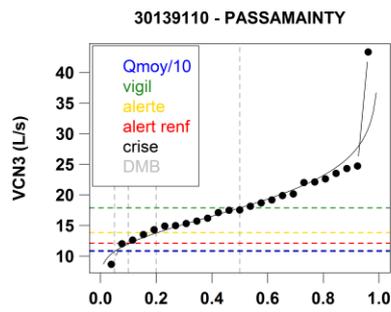
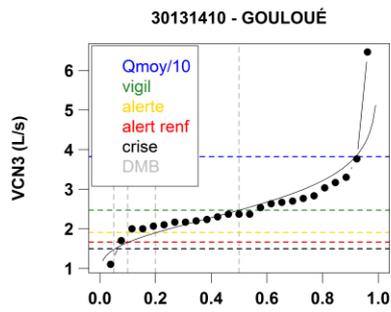


Figure 56 : Période d'occurrence des VCN3 pour l'ensemble des stations



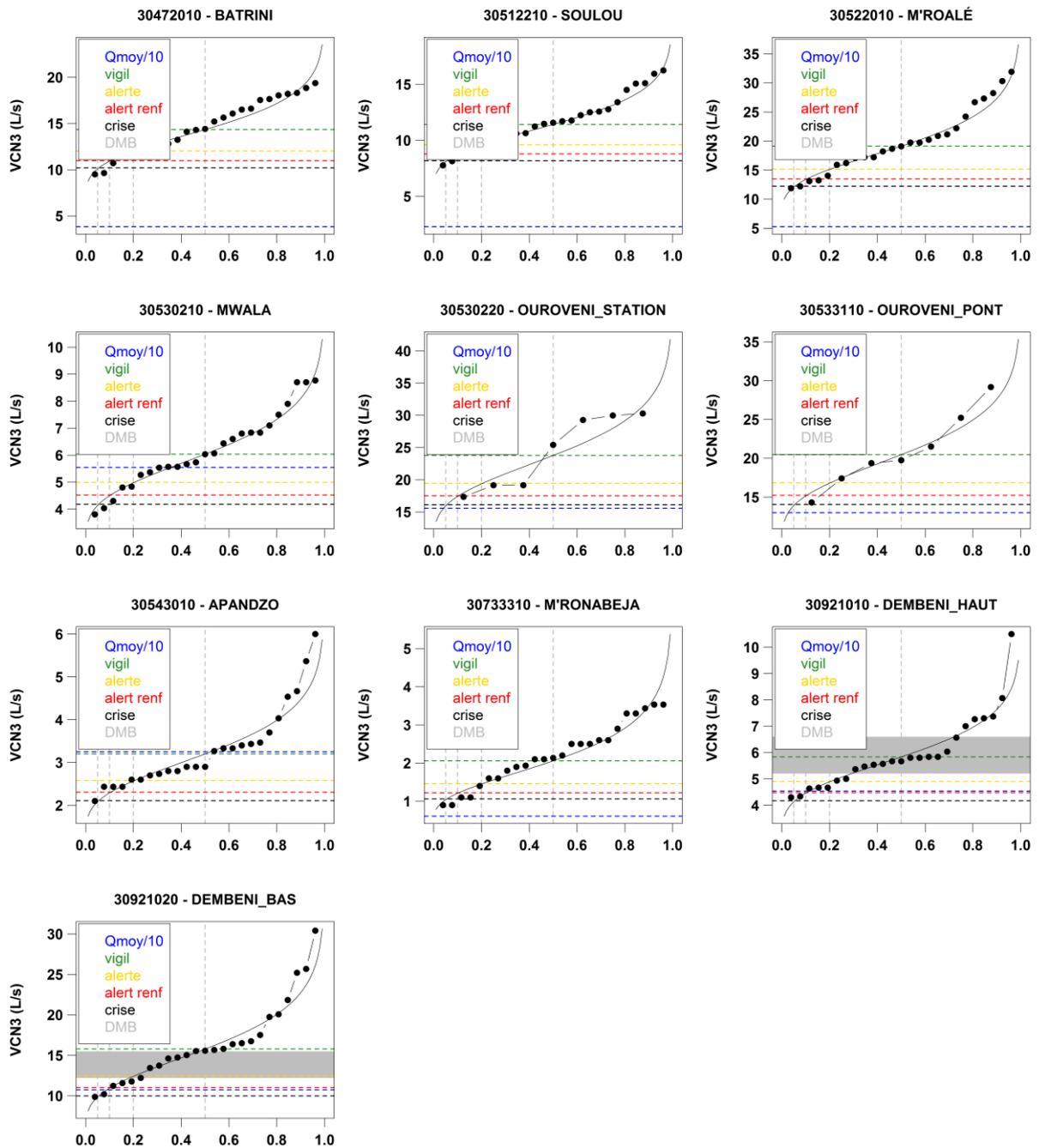


Figure 57 : Distribution des VCN3 (points) et ajustement de loi log-normale pour l'ensemble des stations

Irstea – Centre d'Antony
Hydrosystèmes et bioprocédés
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
tél. +33 (0)140966121
fax +33 (0)140966225
www.irstea.fr