

# Etude des corrélations entre la fonctionnalité du couvert forestier et la qualité et disponibilité de la ressource en eau en Nouvelle-Calédonie

---



*Crédit photo : Mélanie Schaan, La Coulée, Mont-Dore.*

*- Mémoire de fin d'études -*

*Dominante d'approfondissement Gestion des Milieux Naturels*



**Etude des corrélations entre la fonctionnalité du  
couvert forestier et la qualité et disponibilité de la  
ressource en eau en Nouvelle-Calédonie**

- Mémoire de fin d'études –

Dominante d'approfondissement Gestion des Milieux Naturels

Mélanie Schaan

Année 2017-2018

---



## FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE AgroParisTech

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Etude des corrélations entre la fonctionnalité du couvert forestier, la qualité et la disponibilité en eau potentielle en Nouvelle Calédonie.	Mots clés : captages d'eau, services écosystémiques
AUTEUR(S) : Mélanie Schaan	Promotion : 2017 - 2018
Caractéristiques : <b>XX</b> volume-s ; <b>XX</b> pages ; <b>XX</b> figures ; <b>XX</b> annexes ; <b>XX</b> cartes ; bibliographie. <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> <span>1</span> <span>120</span> <span>26</span> <span>17</span> </div>	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : World Wildlife Fund.		
Nom du responsable : Emma Do Khac Fonction : Coordinatrice des programmes forêts.		
Nom du correspondant AgroParisTech : Philippe Duand		
Option D. d'approfondissement CEI	<input type="checkbox"/> Stage 2A <input type="checkbox"/> Stage fin d'études <input type="checkbox"/> Date de remise :	Autre <input type="checkbox"/>

<b>SUITE À DONNER (réservé à la Direction des études)</b>  <input checked="" type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable
---



# Résumé

---

En Nouvelle Calédonie, les forêts humides dans les périmètres de captages, permettant un approvisionnement en eau de bonne qualité toute l'année pour les populations, sont particulièrement menacées par les incendies, l'activité minière et les espèces envahissantes. L'objectif de l'étude menée était d'étudier les corrélations statistiques entre la fonctionnalité des forêts dans les périmètres de captage d'eau et la qualité de l'eau au captage, et de déterminer les surcoûts de gestion de l'eau dus à la dégradation de la forêt (turbidité, entretien, coupures d'eau). L'étude statistique a été menée sur les variables de quantité de matières en suspension, turbidité, Nickel et Chrome, extraites d'analyses d'eau fournies par 15 communes sur toute la Grande Terre. Malgré des limites non négligeables dans la qualité des données, certaines tendances ont été mises en évidence : des valeurs élevées de chrome semblent notamment associées à des bassins versants très dégradés avec une proportion importante de sols nus et d'érosion extrême. Chrome et Nickel ne répondent cependant pas de la même manière, ce qui suppose des différences dans leurs mécanismes de mobilisation. Le manque de données actuel ne permettant pas de répondre de manière fiable à la problématique posée, un protocole plus adapté de suivi de la turbidité en continu, en fonction de l'état du bassin versant a été proposé. Une réflexion sur la mise en place d'un observatoire de l'eau a également été menée, et permettrait aux communes de connaître leur ressource brute et éviter certains surcoûts de gestion qui ne seraient pas supportables. Ces considérations s'inscrivent dans un contexte de construction d'une nouvelle politique de l'eau dans le pays, et tendent à montrer que la protection de la ressource semble être un enjeu prioritaire à considérer pour assurer les besoins grandissants dus au développement démographique et agricole à venir.

# Abstract

---

In New Caledonia, wet forests in water catchment areas, which provide a good quality water throughout the year, are particularly threatened by fires, mining activity, and invasive species. The aim of the study was to analyze the statistical correlations between forests functionality in water catchment areas and water quality, and to determine the overheads of water management due to forests deterioration (turbidity, maintenance, water shortages). The statistical study was carried out on variables of quantities of suspended matter, turbidity, Nickel and Chromium extracted of water analyses given by 15 cities in the "Grande Terre". Despite non-negligible limits in data quality, it showed a few tendencies: for example, high quantities of Chromium seem to be associated with very degraded watersheds, with a high proportion of bare soils, and extreme erosion. However, different results are found for Chromium and Nickel, which could be due to differences in their mobilization mechanisms. As the lack of data didn't enable us to answer the initial problematic, a more adapted protocol of turbidity monitoring, according to the watershed's functionality was proposed. A reflection about the creation of a water observatory was also done, and could allow the cities to know their resource, and avoid the overheads of water management that wouldn't be affordable. These considerations are made in a context of a new water policy construction in the country, and tend to point that resource protection is the main stake to consider to match the future needs due to demographic and agricultural development.



## Engagement de non plagiat

### 1 Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux :
  - Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive.
  - Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

### 2 Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

3 Sanction : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

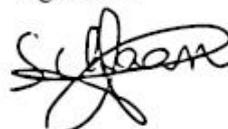
### 4 Engagement :

Je soussigné (e) Mélanie Schaan

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Nancy le 21/09/2018

Signature :



# Remerciements

---

Je remercie tout d'abord Emma Do Khac, pour m'avoir accordé sa confiance dans la réalisation de cette étude, pour sa disponibilité, sa patience, sa bonne humeur, sa gentillesse, et pour avoir su m'accompagner et me conseiller dans les moments plus difficiles.

Je remercie chaleureusement le reste de l'équipe du WWF, Hubert, Thomas et Marc pour ses conseils en statistiques, et à tous pour m'avoir intégrée dans la bonne ambiance du bureau. Bravo à tous les quatre pour votre engagement, ce sont des personnes comme vous qui donnent envie de s'impliquer pleinement dans la protection de l'environnement. J'espère que ce rapport sera à la hauteur de vos espérances et vous permettra d'appuyer le plaidoyer.

Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce rapport, qui ont su m'accorder du temps et me conseiller, notamment Rémi Andreoli du bureau d'études BLUECHAM, l'équipe de la DAVAR, Karine Saume de la DASS, la CDE, le SIGN, la DDR, L'ŒIL de l'environnement, et les fontainiers et employés des mairies des différentes communes.

Merci à Philippe Durand pour ses conseils et son accompagnement, ainsi que Paulina Pinto pour son aide en statistiques.

Enfin, je remercie mes amis qui ont fait de ces six mois en Nouvelle-Calédonie une expérience merveilleuse, et avec qui j'ai pu découvrir une île riche d'histoire, de culture et de paysages : Stéphanie, Alizée, Laetitia, Simon, Thomas et Tobias.

# TABLE DES MATIÈRES

---

Remerciements .....	1
Table des illustrations.....	6
Index des sigles.....	7
Introduction .....	8
<b>1 CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>9</b>
1.1 Présentation de la Nouvelle-Calédonie.....	9
1.1.1 Géographie .....	9
1.1.2 Topographie et géologie .....	9
1.1.3 Climat .....	10
1.1.4 Milieux naturels terrestres .....	10
1.1.5 Démographie .....	10
1.2 La ressource en eau en NC .....	11
1.2.1 Une répartition spatiale et temporelle inégale de la ressource.....	11
1.2.2 Dynamique de l'eau dans les bassins versants .....	12
1.2.3 Approvisionnement en eau des communes.....	12
1.2.4 Règlementation.....	13
1.3 Diagnostic des périmètres de protection des captages par le WWF.....	14
1.3.1 Menaces pesant sur les forêts de captage en Nouvelle-Calédonie.....	14
1.3.2 Objectifs du projet .....	16
1.3.3 Méthode de réalisation du diagnostic .....	16
1.3.4 Limites de l'étude .....	18
1.3.5 Résultats et perspectives.....	18
1.4 Objectif du stage.....	19
1.4.1 Observations de terrain.....	19
1.4.2 Objectifs de l'étude.....	20
<b>2 REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LA FORET POUR LA RESSOURCE EN EAU .....</b>	<b>22</b>
2.1 Définition des services rendus par la forêt pour la ressource en eau .....	22
2.1.1 Influence sur le cycle de l'eau .....	22
2.1.2 Protection contre l'érosion hydrique .....	23
2.1.3 Influence sur les débits d'étiage et les crues.....	24
2.1.4 Lien entre forêts et qualité de l'eau .....	25
<b>3 ANALYSE STATISTIQUE : MATERIEL ET METHODE .....</b>	<b>26</b>
3.1 Lien entre fonctionnalité du couvert forestier et la qualité et la disponibilité en eau : création des bases de données .....	26

3.1.1	Détermination des paramètres à tester/ variables actives .....	26
3.1.2	Variables explicatives relatives à la fonctionnalité du couvert forestier .....	29
3.1.3	Variables explicatives relatives aux caractéristiques du bassin versant .....	29
3.1.4	Création de deux bases de données .....	30
3.1.5	Récapitulatif des variables utilisées.....	31
3.1.6	Analyses statistiques.....	33
3.1.7	Limites et réorientation.....	34
<b>4</b>	<b>RESULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE .....</b>	<b>36</b>
4.1	Base de données qualité de l'eau .....	36
4.1.1	Résultats du diagnostic des bassins versants étudiés .....	36
4.1.2	Corrélation entre le diagnostic et la qualité de l'eau .....	36
4.1.3	Test sur les évènements pluvieux .....	41
4.2	Base de données PSSE .....	42
4.2.1	Analyse statistique.....	42
4.2.1	Comparaison graphique.....	43
4.3	CONCLUSION – DISCUSSION SUR L'ANALYSE STATISTIQUE .....	44
<b>5</b>	<b>PROPOSITION DE PROTOCOLE .....</b>	<b>47</b>
5.1	Objectifs et méthodes .....	47
5.2	Paramètres à suivre.....	47
5.2.1	Suivi du régime hydraulique.....	47
5.2.2	Suivi de la concentration en matières en suspension.....	48
5.2.3	Suivi de la pluviométrie.....	48
5.2.4	Suivi des captages.....	49
5.2.5	Interprétation des résultats.....	49
5.3	Coûts des investissements et du fonctionnement.....	49
5.3.1	Matériel.....	49
5.3.2	Main d'œuvre .....	50
5.4	Choix des bassins versants à expérimenter.....	50
5.4.1	Bassin versants jumeaux ou suivi temporel d'un seul bassin versant.....	50
5.4.2	Articulation possible avec des projets déjà existants.....	50
<b>6</b>	<b>REFLEXION SUR LA MISE EN PLACE D'UN OBSERVATOIRE DE LA QUALITE DE L'EAU EN NOUVELLE CALEDONIE.....</b>	<b>52</b>
6.1	Observatoire actuel de la ressource en eau AEP .....	52
6.2	La nécessité de mettre en place le réseau .....	52
6.2.1	Objectifs de la réflexion .....	53
6.3	PARAMETRES A SUIVRE ET FREQUENCE .....	53
6.3.1	Paramètres de qualité de l'eau .....	53
6.3.2	Paramètres de fonctionnement du captage .....	55
6.4	PRIORISATION DES CAPTAGES A SUIVRE .....	55

6.5	COUT DU DISPOSITIF ET FINANCEMENTS DISPONIBLES .....	55
6.6	mise en place du suivi, gestion et mutualisation des données .....	56
6.7	Règlementations nécessaires .....	56
<b>7</b>	<b>ELEMENTS DE CHIFFRAGE DU SERVICE ECOSYSTEMIQUE RENDU PAR LA FORET POUR LA RESSOURCE EN EAU POTABLE.....</b>	<b>57</b>
7.1	Evaluation économique des services écosystémiques .....	57
7.1.1	Valeur des services écosystémiques .....	57
7.1.2	Méthodes d'évaluation des services écosystémiques .....	57
7.2	Service de régulation de la qualité de l'eau par stabilisation des sols .....	58
7.2.1	Surcoûts de traitement de l'eau.....	58
7.2.2	Surcoûts d'entretien des captages.....	59
7.2.3	Surcoûts d'utilisation d'une autre ressource.....	60
7.2.4	Surcoûts d'un manque de ressource .....	60
7.2.5	Surcoûts sanitaires .....	61
7.3	Service de régulation de la qualité de l'eau par filtration/autoépuration.....	61
7.3.1	Coûts de remplacement du service .....	61
7.4	Service de soutien aux étiages : méthode des coûts directs.....	61
7.5	Bilan .....	62
7.5.1	Récapitulation des différents surcoûts .....	62
7.5.2	Paieement pour service écosystémique .....	63
	Conclusion.....	65
	Bibliographie .....	66
	Annexes .....	69
	Annexe 1 : Carte de l'emplacement des massifs de péridotites et débits critiques d'étiage .....	70
	Annexe 2 : Détails de l'étude PPCE.....	71
	Annexe 3 : Carte du résultat du diagnostic 2018 .....	77
	Annexe 4 : Identification du risque sanitaire et évaluation du niveau de risque.....	78
	Annexe 5 :Résultats de la régression linéaire multiple et analyse graphique des résidus (Exemple du Chrome) .....	80
	Annexe 6 : Boxplots des distributions de Cr, Ni et Turbidité en fonction des facteurs influençant. ....	82
	Annexe 7 : Résultats détaillés de l'ACP (Base de données totale) .....	85
	Annexe 8 : Résultats détaillés de l'ACP (Bassins versants <50km <sup>2</sup> ).....	89
	Annexe 9 : Résultats détaillés de l'ACP (Bassins versants de moins de 20km <sup>2</sup> ).....	92
	Annexe 10 : Résultats détaillés de l'analyse sur la base de données « pluviometrie » .....	95
	Annexe 11 : ACP Base de données « pluviometrie » ( tous bassins versants).....	96
	Annexe 12 : ACP Base de données « pluviometrie » (bassins versants <50km <sup>2</sup> ).....	99
	Annexe 13: ACP Base de données « pluviometrie » (bassins versants <20km <sup>2</sup> ).....	102
	Annexe 14 : Test du Khi 2 sur la base de données « PSSE ».....	105
	Annexe 15 : ACO SUR LA BASE DE DONNEES « psse » (bassins versant <10km <sup>2</sup> ) .....	107

Annexe 16 : étude graphique des discordances entre niveau de risque de turbidité et état de fonctionnalité du bassin versant – Commune de Païta.....	110
Annexe 17 : Détails du calcul de la construction des stations de décantation .....	111

# Table des illustrations

---

Figure 1: Localisation de la Nouvelle Calédonie dans la Pacifique Sud (gauche), et carte de la Nouvelle Calédonie (droite).....	9
Figure 2 : caractérisation des HER néo-calédoniennes .....	11
Figure 3 : Traces d'incendies sur la Montagne des Sources (en haut à gauche, crédit photo : N.Petit), Dégradation du sous-bois par les cerfs dans le bassin versant du captage de Haccinem, commune de Touho (en haut à droite, source : rapport RESCCUE, 2015), Exploitation minière sur la Dumbéa (en bas à droite, crédit photo : H.Géraux).....	15
Figure 4: Arbre de décision de calcul de la fonctionnalité d'un bassin versant. Tendance paysagère 1 : milieu dominé par des formations arborées et arbustives ; Tendance paysagère 2 : mosaïque de formations arbustives et herbacées prédominantes avec présence de sols nus ; Tendance paysagère 3 : milieu ouvert avec présence importante de sols nus, dont la végétation majoritaire est éparse et herbacée.....	18
Figure 5 : Résultats du diagnostic de 2016.....	19
Figure 6 : Evolution du volume utile du barrage de la Dumbéa au cours du temps, source : Calédonienne des Eaux.....	20
Figure 7: Schéma simplifié du cycle de l'eau (source : Thüler, 2014) .....	23
Figure 8: Répartition analyses recueillies.....	33
Figure 9: Cercle de corrélation des variables de l'ACP et classification .....	40
Figure 10: Comparaison du niveau de risque de turbidité et de l'état de fonctionnalité, commune de Touho	43
Figure 11: Comparaison du niveau de risque de turbidité avec l'occupation du sol, commune de Touho.....	44
Figure 12 : Seuil utilisé pour le protocole Hydromine .....	48
Figure 13 : Exemple de couples de bassins versants possibles pour l'expérimentation.....	51
Tableau 1: Taux d'érosion en fonction de l'occupation des sols (Bryant et al., 1998).....	24
Tableau 2: Variables actives de la base de données .....	31
Tableau 3: Effectifs de la base de données qualité de l'eau .....	33
Tableau 4 : Résultats du diagnostic .....	36
Tableau 5 : Matrices des corrélations de Kendall.....	36
Tableau 6 : Résultats de la comparaison de moyennes de Kruskal Wallis.....	39
Tableau 7: Résultats de la classification.....	40
Tableau 8 : Effectifs utilisés pour l'analyse suite à un évènement pluvieux.....	41
Tableau 9: Coût du dispositif.....	49
Tableau 10 : Recommandations des paramètres analysés et fréquence des analyses à la ressource .....	54
Tableau 11: Proposition de paramètres à suivre et fréquence .....	55
Tableau 12: Valeurs des services écosystémiques, source : INRA , SIA 2014.....	57
Tableau 13: Tableau récapitulatifs des surcoûts entraînés par la perte de services écosystémiques (en bleu : nombres ayant servi pour calculer le total).....	63

# Index des sigles

---

<b>ACM</b>	Analyse en composantes multiples
<b>ACP</b>	Analyse en composantes principales
<b>AEP</b>	Adduction d'eau potable
<b>CDE</b>	Calédonienne des Eaux
<b>CNRT</b>	Centre National de Recherche Technologique
<b>DASS</b>	Direction des affaires sanitaires et sociales
<b>DAVAR</b>	Direction des affaires vétérinaires, alimentaires et rurales
<b>DCE</b>	Débit critique à l'étiage
<b>DDR</b>	Direction du développement rural
<b>DDEE</b>	Direction du Développement Economique et de l'Environnement
<b>DTSI</b>	Direction des technologies et des services de l'information
<b>EEE</b>	Espèce exotique envahissante
<b>FLOW</b>	Forest landscape as opportunity for water
<b>HER</b>	Hydro-éco-région
<b>INSEE</b>	Institut national de la statistique et des études économiques
<b>IRD</b>	Institut pour la recherche et le développement
<b>MES</b>	Matières en suspension
<b>NFU</b>	Formazine nephelometric unit
<b>NTU</b>	Nephelometric turbidity unit
<b>PPCE</b>	Périmètre de protection de captage d'eau
<b>PSSE</b>	Plan de sécurité sanitaire des eaux
<b>RESCCUE</b>	Restoration of ecosystem services and adaptation to climate change
<b>SADET</b>	Société anonyme des eaux de la Tontouta
<b>TD</b>	Tranchée drainante
<b>UD</b>	Unité de distribution
<b>WWF</b>	Fond mondial pour la nature

# Introduction

---

Depuis plus d'une dizaine d'années, le Fonds Mondial pour la Nature (WWF), organisation non-gouvernementale, s'efforce en Nouvelle-Calédonie de mettre en valeur le rôle des forêts non seulement en tant que réserve de biodiversité endémique, mais également pour la protection de la ressource en eau. En effet, les forêts humides de Nouvelle-Calédonie localisées sur les bassins versants en amont des captages d'eau potable prodiguent de nombreux services écosystémiques notamment de stabilisation des sols, de stockage de l'eau en saison humide et de restitution de l'eau en saison sèche. Elles sont actuellement menacées essentiellement par les incendies réguliers, l'exploitation minière, ainsi que les espèces envahissantes qui ravagent les sous-bois et empêchent leur régénération, ce qui peut impacter la ressource en eau du territoire.

Une étude débutée par le WWF en 2015, a permis de développer une méthode d'évaluation de l'état de fonctionnalité des forêts dans les périmètres de protection des captages d'eau au regard des services de stabilisation des sols, de tampon hydrique et de résilience face aux incendies. Cette méthode innovante, basée sur l'analyse de données satellitaires de 2008, a permis de diagnostiquer que plus de 90% de la surface des périmètres de protection des captages était dans un état de fonctionnalité « dégradé » à « très dégradé » d'après les critères retenus. Une actualisation de l'étude va être réalisée sur toute la Grande Terre, d'après des images satellites de 2017, et la méthode a été étendue au Vanuatu, à Wallis et Futuna et aux îles Fidji. Les résultats ont été présentés aux communes du territoire, constituent un outil d'aide à la décision pour la préservation de la ressource en eau des collectivités.

L'étape suivante de l'étude, qui fait l'objet du stage et du présent rapport, est de rechercher une corrélation statistique éventuelle entre l'état de fonctionnalité déterminé par le diagnostic, et les dysfonctionnements des captages recensés sur le terrain, en termes de qualité et de disponibilité en eau. En effet, de nombreuses communes sont touchées par des apports terrigènes au captage, récurrents en saison humide, et des pénuries d'eau dues aux étiages sévères en saison sèche. Un chiffrage du service écosystémique rendu par la forêt pour la ressource en eau en Nouvelle Calédonie sera également proposé. La mise en évidence du rôle des forêts de captages pour les populations, ainsi que des surcoûts entraînés par leur dégradation, permettrait de continuer la sensibilisation des collectivités à la protection de ces forêts.

Une présentation du contexte climatique et politique particulier de la Nouvelle-Calédonie, et une description plus précise de l'étude menée par le WWF et de la problématique du stage seront effectuées, suivies d'une revue bibliographique du lien entre les forêts et la ressource en eau. Les méthodes utilisées pour répondre aux objectifs, les résultats de l'étude statistiques, un chiffrage du service écosystémique des forêts de bassins versants seront ensuite présentés. Enfin, un protocole plus adapté à la problématique, ainsi qu'une réflexion sur un observatoire nécessaire de la qualité de l'eau brute dans le cadre de l'établissement de la nouvelle politique de l'eau de l'île seront développés.

# 1 CONTEXTE DE L'ETUDE

## 1.1 PRESENTATION DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

### 1.1.1 Géographie

Située à 22 000 km de la France métropolitaine, la Nouvelle Calédonie est un archipel situé dans le Pacifique Sud faisant partie de l'ensemble mélanésien composé de la Nouvelle-Guinée, la Vanuatu, Les îles Fidji et Salomon, à l'est de l'Australie et au Nord de la Nouvelle-Zélande.

L'archipel est composé de l'île principale nommée « Grande Terre » (16 000 km<sup>2</sup> soit deux fois la Corse, 500 km de long sur 50 de large) orientée selon un axe Nord-Ouest/ Sud-Est, des îles Loyauté à 150km à l'Est, de l'île des pins au Sud et l'île de Bélep au Nord. Elle est bordée à l'Ouest par la mer de Corail et à l'Est par l'océan pacifique. (Ministère des Outre-Mer, 2016).

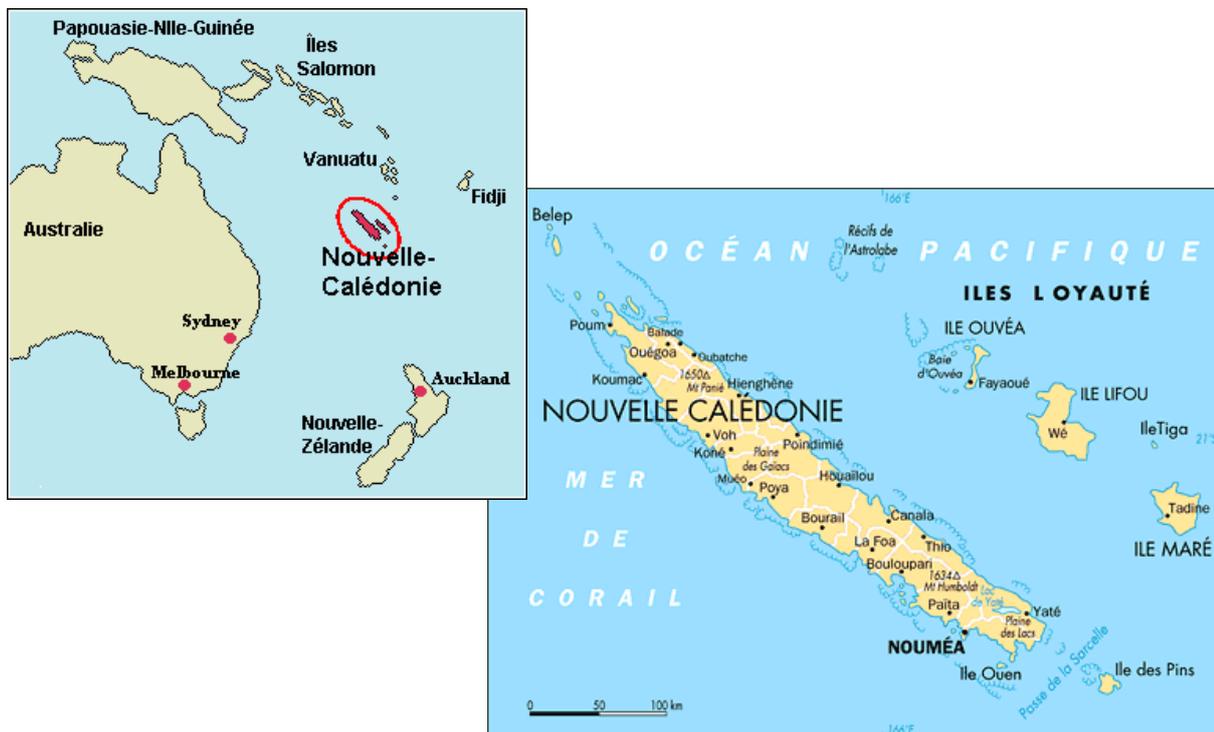


Figure 1: Localisation de la Nouvelle Calédonie dans la Pacifique Sud (gauche), et carte de la Nouvelle Calédonie (droite)

### 1.1.2 Topographie et géologie

La Grande Terre est traversée sur la longueur par une chaîne centrale dont l'altitude varie entre 1000 et 1600m d'altitude.

L'île faisait initialement partie du Gondwana, supercontinent regroupant entre autres l'Australie et l'Antarctique, dont elle s'est détachée au Crétacé (il y a 70 mA) et a dérivé dans le Pacifique, ce qui a fait émerger par chevauchement une partie du manteau terrestre. Cette histoire géologique particulière a conduit à l'actuelle présence de massifs de péridotites, roches ultramafiques (ou ultrabasiques, pauvres en silice et riche en fer et magnésium), sur un tiers de la surface de la Grande Terre. L'altération des péridotites, dans un contexte de climat tropical humide a entraîné leur enrichissement en Nickel, Chrome, Cobalt et Fer et formé les latérites, naturellement friables et sensibles à l'érosion. La Nouvelle Calédonie contient ainsi le quart des réserves

mondiales de Nickel, qui y est exploité depuis près de 140 ans, et constitue la principale activité économique du pays (Bonvallot *et al.*, 2012).

### 1.1.3 Climat

Située dans la zone intertropicale, la Nouvelle-Calédonie bénéficie d'un climat qualifié de « tropical océanique », marqué par les brises locales et le régime général des vents d'est. On distingue deux saisons principales : une saison chaude et humide, de mi-novembre à mi-avril, caractérisée par de fortes dépressions à tendance cyclonique, et une saison fraîche et sèche de mi-mai à mi-septembre, caractérisée par de nombreux feux de brousse. Le climat et le relief de l'île induisent des variations spatiales et temporelles des régimes hydrologiques qui seront présentées par la suite.

### 1.1.4 Milieux naturels terrestres

Différents milieux naturels caractérisent la Nouvelle-Calédonie, parmi lesquels : la mangrove, le maquis minier, la forêt dense humide, la forêt sèche, les savanes... Nous pouvons présenter brièvement les principaux qui seront mentionnés lors de l'étude.

#### 1.1.4.1 La forêt dense humide

La forêt humide couvre actuellement 20% de la superficie du territoire, soit 25% de sa surface d'origine. Elle se développe sous des climats chauds et humides, sur tout type de sol, et les espèces qui la composent conservent leurs feuilles toute l'année. Cette forêt est quasiment primaire et présente sur les massifs de la chaîne centrale, majoritairement sur la côte Est. L'endémisme végétal y est de 80% (Observatoire de l'environnement).

#### 1.1.4.2 Le maquis minier

Le maquis minier couvre actuellement 23% du territoire. Les espèces qui le composent sont adaptées aux sols ultramafiques très riches en métaux de type Fer, Magnésium et Nickel, et très pauvres en éléments nutritifs, ce qui lui confère 88% d'endémisme végétal, et sont très vulnérables aux incendies. La majeure partie du maquis est issue de la dégradation des forêts humides sur sol ultramafiques (Observatoire de l'environnement).

#### 1.1.4.3 La savane à niaouli

Cet écosystème d'origine anthropique, couvrant près du tiers de la Nouvelle-Calédonie, essentiellement sur la côte Ouest et au Nord jusqu'à 600 m d'altitude, résulte de la disparition des végétations d'origine sous les pressions humaines (défrichage, élevage, feux). Seul le Niaouli, particulièrement résistant de par ses propriétés ignifuges, résiste au passage des feux et devient l'espèce dominante du milieu (Cherrier, 1981).

### 1.1.5 Démographie

Le pays est divisé en 3 Provinces (Nord, Sud et Iles Loyauté) et 33 communes. Les habitants résident majoritairement sur l'île principale, région la plus riche de l'archipel, caractérisée par un fort dynamisme démographique. Le recensement de 2014 de l'INSEE estime la population totale à 268 767 habitants qui se répartissent comme suit :

- Province Sud : 199 983 habitants (74,40%)
- Province Nord : 50 487 habitants (18,79%)
- Province des Iles (Loyauté) : 18 297 habitants (6,9%)

La répartition spatiale de la population révèle une certaine concentration : 37 % de la population du territoire habite la commune de Nouméa, sur la côte sud-ouest de la Grande Terre, en Province Sud. L'aire urbaine du chef-lieu, portant le nom de Grand Nouméa, composé des communes de Nouméa, le Mont-Dore, Dumbéa et Païta, regroupe quant à elle environ 66 % de la population du pays.

## 1.2 LA RESSOURCE EN EAU EN NC

### 1.2.1 Une répartition spatiale et temporelle inégale de la ressource

Avec un apport pluviométrique d'en moyenne 1850 mm/an, la ressource en eau superficielle est abondante, mais répartie inégalement dans le temps et l'espace. Le relief et l'orientation au vent influencent la répartition des pluies et donc l'écoulement sur les deux versants de l'île. Trois grandes régions hydrologiques peuvent être définies selon leur climat, leur géologie et leur topographie : La côte Est (exposée au vent, >1700 mm/an), la côte Ouest (sous le vent, <1300 mm/an) et le Sud (>1700 mm/an). Les cours d'eau de la côte Est et de l'extrême Sud, qui présente notamment une hydrogéologie karstique sur certains bassins versants, ont des débits spécifiques plus élevés que ceux de la côte Ouest (Cazé et Jobin, 2009).

Une étude réalisée en 2011 dans le cadre des conseils de l'Eau a permis de définir 6 grandes hydro-écorégions en Nouvelle-Calédonie dont les grandes caractéristiques sont présentées sur la figure ci-dessous.

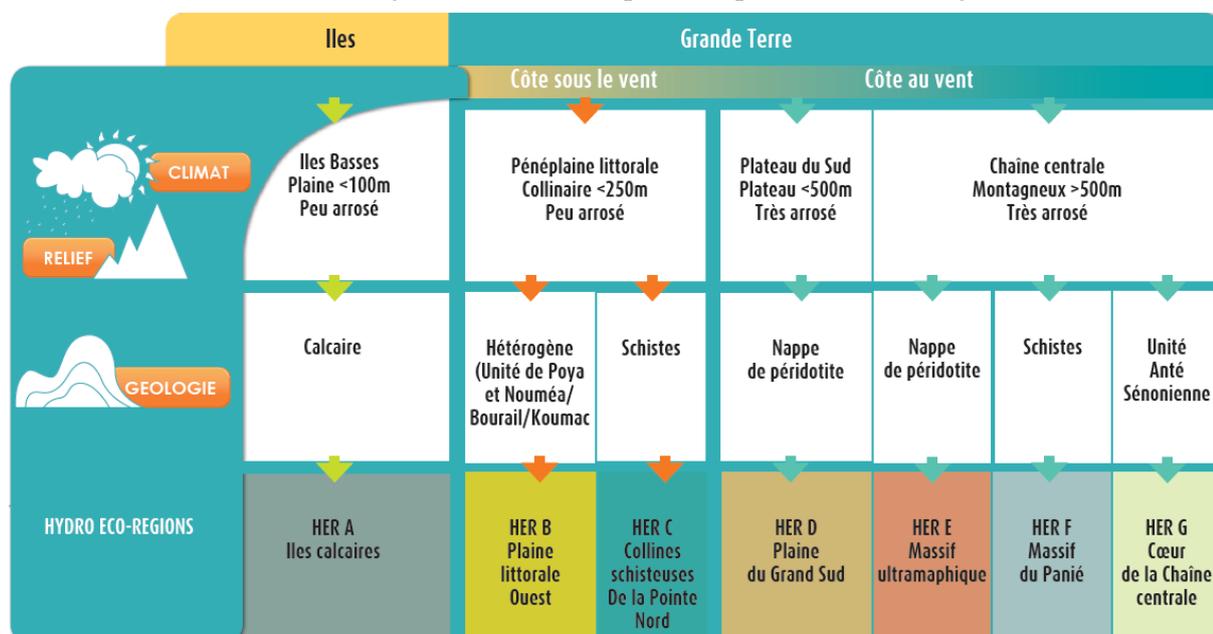


Figure 2 : caractérisation des HER néo-calédoniennes

De par le climat océanique de l'île, les régimes hydrologiques sont également soumis à une irrégularité saisonnière. La saison chaude et humide de décembre à mai, représente plus de 70% des écoulements, et se caractérise par de fortes dépressions tropicales entraînant des crues violentes. Durant la saison fraîche et sèche, de juin à novembre, (seulement 6 à 10 % des volumes annuels entre septembre et novembre), les débits caractéristiques des cours d'eau sont diminués, certains même se tarissent. Cette saisonnalité est plus marquée dans le quart Nord-Ouest que dans le Sud. On constate également une forte variabilité interannuelle des débits de crues et d'étiage, ainsi que selon la géologie (Bonvallot *et al.*, 2012).

### **1.2.1.1 Les étiages**

Le débit caractéristique d'étiage (DCE) correspond au débit moyen journalier, dépassé 355 jours par an (Bonvallet *et al.*, 2012). Les niveaux d'étiage les plus sévères se produisent dans le secteur Nord-Ouest, où l'assèchement complet de certains cours d'eau peut être observé à certaines périodes de l'année. En l'absence de précipitations, les débits d'étiage sont exclusivement alimentés par les nappes souterraines : nappes perchées, nappes de piémont ou nappes alluviales.

### **1.2.1.2 Influence des péridotites sur les débits d'étiage**

Les études réalisées sur la Nouvelle-Calédonie tendent à montrer que la nappe des péridotites constitue un aquifère multicouche potentiellement intéressant en termes de stockage en eau et pourrait jouer un rôle de régulateur pour les débits des cours d'eau (Jeanpert, 2010). Il est notamment apparu qu'une proportion grandissante de péridotites à la surface des bassins augmentait le débit spécifique d'étiage, lorsque les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 1800 mm/an. Ces réservoirs sont cependant fortement dépendants de leur taille, de leur recharge par les pluies et de la topographie : la présence de massifs latéritiques à la surface d'un bassin n'est donc pas une condition suffisante à un soutien efficace de l'étiage. Il faut que ces derniers soient suffisamment vastes et suffisamment arrosés en saison hivernale pour assurer une alimentation continue du cours d'eau en étiage (Fryso, 2008). La carte de comparaison des emplacements des massifs de péridotites et des débits critiques d'étiage est présente en Annexe 1.

### **1.2.1.3 Crues et inondations**

Lors de phénomènes cycloniques ou dépressions tropicales importantes, les précipitations peuvent atteindre les 100 mm/h, ce qui entraîne des phénomènes de saturation des sols et des coefficients de ruissellement élevés (40 à 80 % pour les grands bassins versants). Les temps de concentration de ces précipitations à l'aval des bassins versants est de quelques heures, pour une vitesse moyenne de transfert de 2,6 m/s. Les débits de crues sont plus faibles dans la région Sud car les temps de concentration sont plus longs dû à la géologie, la présence de plateaux, de lacs, et aux écoulements sub-surfaciques.

## **1.2.2 Dynamique de l'eau dans les bassins versants**

La chaîne montagneuse centrale de l'île étant constituée de bassins versants montagneux de taille réduite et à forte pente, avec un sous-sol plutôt imperméable. Les nappes perchées sont généralement peu développées et seules quelques nappes alluviales sont exploitées sur la côte Ouest. On constate une dissymétrie du relief entre les plaines côtières de la côte Ouest, et les vallées encaissées et abruptes de la côte Est : cette structure ne permet pas le développement de bassins versants de grande étendue et de cours d'eau importants. Le bassin le plus vaste est celui de la Yaté qui, à son embouchure, a une superficie de 437 km<sup>2</sup>. Les conséquences hydrologiques de la topographie et de la pédologie sont des temps de transferts hydriques très courts (quelques heures à quelques jours), ce qui peut créer des crues « éclaires », des processus érosifs extrêmes lors des périodes de fortes précipitations, et des étiages parfois sévères en été.

## **1.2.3 Approvisionnement en eau des communes**

Du fait des conditions hydrologiques et topographiques présentées précédemment, sur les 416 captages publics en Calédonie environ 61% des captages sont superficiels, et 36% sont des forages, contre 95% en France métropolitaine (DAVAR, 2018). Seulement 54% ont actuellement des périmètres de protection de captage d'eau (PPCE) régularisés, périmètres établis autour des sites de captage d'eau pour assurer la protection de la ressource en règlementant les sources de pollution potentielle, démarche entreprise en 2007.

Trois types de ressource sont utilisés pour assurer l’approvisionnement en eau potable de Nouméa (100 000 habitants environ) : le barrage de la Dumbéa (d’où provient 86 % de la ressource), le Grand Tuyau de la Tontouta (13 %), ainsi que 7 forages dans la nappe alluviale (1 %) (Ville de Nouméa, 2016). Le Grand Tuyau, géré par la Société anonyme des eaux de Tontouta (SADET), long de 46 km et de 1 m de diamètre, approvisionne le Grand Nouméa en eau depuis un champ captant de 11 forages dans la nappe alluviale de la Tontouta. Il a été construit en 2000 pour répondre aux besoins futurs de l’agglomération du Grand Nouméa en pleine expansion démographique. Il alimente également les 3 autres communes de Grand Nouméa, qui disposent également de captages dans leur propre réseau hydrographique.

Les autres communes de la Grande Terre sont alimentées à partir de captages sur leur réseau hydrographique communal et/ou par pompage dans les nappes alluviales essentiellement sur la côte Ouest (La Foa, Pouembout, Koumac, Boulouparis). Le traitement des eaux (appliqué aux deux tiers des captages) est en général limité à une simple chloration. 7 % des ménages n’ont pas accès à l’eau, essentiellement les habitations isolées des villages de « brousse » (DAVAR, 2018).

La construction d’un second barrage d’approvisionnement en eau potable et d’irrigation est actuellement en projet à Pouembout, dans la province Nord, pour répondre à l’urbanisation de la zone VKP (Voh-Koné-Pouembout, soit 13 000 habitants), et au développement de l’agriculture.

La Calédonienne des eaux (CDE), filiale de GDF Suez, est prestataire pour la production, l’adduction et la distribution de l’eau potable ainsi que l’assainissement des communes du Grand Nouméa, La Foa, et Boulouparis en Province Sud. En province Nord, elle œuvre sous le nom d’AquaNord sur la zone Voh-Koné-Pouembout. Le reste des communes assure la gestion de l’adduction par des sociétés d’affermage ou en régie.

#### 1.2.4 Règlements

Du fait de son statut juridique bien particulier (collectivité *sui generis* définie par la loi organique du 19 mars 1999), la Nouvelle-Calédonie ne fait pas partie de la Communauté Européenne et de ce fait, la Directive Cadre sur l’Eau, qui définit un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique avec une perspective de développement durable (EauFrance, 2013), ne s’y applique pas.

En Nouvelle- Calédonie, l’eau est une compétence dont la gestion très complexe est partagée (DAVAR) entre :

- Les communes, compétentes pour l’alimentation en eau potable, l’assainissement et la salubrité publique,
- Les Provinces, compétentes pour la protection de l’environnement, la prévention des pollutions et des risques,
- Le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, compétent en matière d’hygiène publique et de santé, de préservation et de suivi de la ressource en eau, de gestion du domaine public fluvial et de sécurité civile,
- L’Etat français, compétent pour la salubrité publique et la sécurité publique, en cas de carence du maire.

Deux institutions gouvernementales sont en charge des problématiques liées à l’eau :

- **La Direction des affaires vétérinaires alimentaires et rurales (DAVAR)** : chargée entre autres de la mise en œuvre de la politique de la Nouvelle Calédonie en matière de ressource en eau du domaine public au travers de 3 actions principales : la gestion des demandes de travaux dans les cours d’eau, la

création des périmètres de protection des eaux, et le financement et le suivi de l'entretien des cours d'eau. Elle contrôle également le respect des textes réglementaires sur le terrain. Une cellule « qualité de l'eau » assure un suivi des cours d'eau et des nappes phréatiques, et assiste les collectivités pour la gestion de l'eau.

- **La Direction des affaires sanitaires et sociales (DASS)** : chargée de la mise en œuvre de la politique en matière de protection sociale, d'hygiène publique, de santé, de contrôles sanitaires... Un bureau « santé environnement » est notamment chargé de la surveillance de la qualité de l'air, des eaux de baignade et de consommation.

La délibération n°105 du 9 août 1968 sert de référence dans le domaine de l'eau et n'a jamais été modifiée depuis. Les thématiques règlementées sont les suivantes :

- La lutte contre la pollution des eaux : il est interdit de déverser dans les eaux superficielles des matières polluantes pouvant porter atteinte à la qualité de l'eau, à la santé publique, à la faune et la flore marine.
- Les prélèvements d'eau : toute prise d'eau superficielle ou souterraine doit être autorisée.
- Les périmètres de protection : ils doivent être délimités autour de tous les captages destinés à l'alimentation des collectivités humaines.
- La potabilité : la DASS se réfère aux normes de potabilité métropolitaines de 2007 car celles énoncées par le décret calédonien de 1979 sont obsolètes.

Dans la pratique cependant, les dispositions de la délibération sont insuffisantes pour assurer une gestion équilibrée et durable de la ressource, et pose des difficultés d'application du fait de la division des compétences entre les collectivités. Une nouvelle politique de l'eau est actuellement en cours d'élaboration et devrait voir le jour fin 2018.

### **1.3 DIAGNOSTIC DES PERIMETRES DE PROTECTION DES CAPTAGES PAR LE WWF**

#### **1.3.1 Menaces pesant sur les forêts de captage en Nouvelle-Calédonie**

Toutes les forêts d'altitude et 90% des forêts humides sont protégées par des réglementations, leurs reliefs ou leur isolement (FAO, 2010). Cependant, plusieurs menaces pèsent sur les forêts dans les PPCE, se répercutant directement sur la ressource en eau, les principales étant présentées ci-dessous.

##### **1.3.1.1 Les espèces exotiques envahissantes**

Le cerf rusa, introduit en 1870, et le cochon ensauvagé sont source de nombreux dégâts pour les forêts humides et les sous-bois : abrutissement empêchant la régénération, écorçage, piétinement. L'abrutissement associé à un piétinement trop important entraîne la mise à nu des sols et donc accroît leur sensibilité à l'érosion, au ravinement et au lessivage (Collectif ICONNE, 2015 ; Bonnefois, 2010). Actuellement, les experts estiment entre 250 000 et 370 000 la population de cerfs sur l'île, soit plus que la population humaine (Wery, 2010).

##### **1.3.1.2 Les feux**

Plus de 20 000 ha partent en fumée chaque année sur le territoire. Ces feux sont principalement d'origine humaine : liés aux pratiques culturelles, pratiques de chasse, prospection minière auparavant, inattention, actes de malveillance. Ces feux répétés et fréquents menacent la dynamique des forêts en augmentant la fragmentation, ce qui, outre les effets associés à la disparition du couvert végétal, diminue leur résilience (Andreoli *et al.*, 2016).

### 1.3.1.3 L'activité minière

L'exploitation minière du nickel est pratiquée à ciel ouvert sur de vastes surfaces (plus de 300 000 ha de concessions minières, dont la totalité n'est pas exploitée, soit 18 % de la superficie du pays) (Dumas et Cohen, 2014). Elle fut historiquement accompagnée d'une prospection par le feu qui n'est plus d'actualité mais dont la végétation souffre encore aujourd'hui. Néanmoins cette activité reste synonyme d'un décapage des sols, de l'ouverture de pistes, et de forts terrassements provoquant une modification de la topographie et de l'écoulement hydrique du bassin versant. Actuellement, 24 % de la surface des PPCE sont sur des concessions minières, exploitées ou non (DAVAR, 2018). Les sols dénudés sont ainsi particulièrement sujets à l'érosion qui entraîne une augmentation de la turbidité et de l'engrèvement dans les cours d'eau, impactant l'eau potable mais aussi les récifs du lagon (UNC et IRSTEA, 2016).

### 1.3.1.4 L'érosion

L'érosion, processus naturel favorisé par le contexte climatique marqué par des épisodes pluvieux intenses en saison humide, et de fortes pentes, constitue un problème environnemental majeur sur la Grande Terre. Elle peut cependant être accentuée par les actions anthropiques comme celles citées précédemment. Une érosion trop importante peut affecter les sols, la végétation et la faune associée, par destruction mécanique (ravines), apports en sédiments et en contaminants (métaux et polluants divers) dans les milieux aquatiques, modification de la qualité physico-chimique de l'eau et dépôts sédimentaires (Bertaud, 2013). Suites à de fortes précipitations, des zones fortement érodées présentent des risques de glissement de terrain et de coulées de boues pouvant être destructrices.



Figure 3 : Traces d'incendies sur la Montagne des Sources (en haut à gauche, crédit photo : N.Petit), Dégradation du sous-bois par les cerfs dans le bassin versant du captage de Haccinem, commune de Touho (en haut à droite, source : rapport RESCCUE, 2015), Exploitation minière sur la Dumbéa (en bas à droite, crédit photo : H.Géraux)

### 1.3.1.5 Pollution chimique d'origine agricole

L'agriculture est encore peu développée en Calédonie. Une culture céréalière destinée à l'alimentation du bétail est pratiquée sur les plaines alluviales de la Côte Ouest, ainsi qu'un élevage extensif (bœuf, porcs) pour lequel l'épandage de fumier n'est pas fréquent. Sur la côte Est, une agriculture vivrière traditionnelle est pratiquée sans engrais chimique. Les analyses d'eau effectuées par la DAVAR dans les bassins versants à risque n'ont encore jamais permis de mettre en évidence une pollution aux nitrates, excepté pour 2 forages de Nouméa qui ont alors été abandonnés (Cazé et Jobin, 2009).

### 1.3.2 Objectifs du projet

Depuis plus d'une dizaine d'années, le WWF s'efforce en Nouvelle-Calédonie de mettre en valeur le rôle des forêts non seulement en tant que trésor de biodiversité, mais également pour la protection de la ressource en eau, au vu des services écosystémiques rendus de stabilisation des sols et de régulation hydrique notamment.

Les périmètres de protection des captages d'eau, étaient originellement recouverts de forêts humides peu accessibles et donc théoriquement bien conservées. Or, les feux à répétition, l'exploitation minière et la pression des espèces exotiques envahissantes ont fortement dégradé certaines zones, qui évoluent alors vers du maquis minier ou des savanes à niaoulis, formations arbustives et herbacées, voire vers un sol nu. Ces dégradations entraînent une perte de biodiversité faunistique et floristique mais mettent également en péril la ressource hydrique en Nouvelle Calédonie.

En effet, la mise à nu des sols accentue également les processus d'érosion, ce qui peut se traduire par l'engravement voire la mise hors service de captages d'eaux superficielles, des problèmes de qualité de l'eau, d'inondations et de glissements de terrain. Elle diminue également les possibilités d'infiltration d'eau et donc le rechargement des nappes phréatiques, ce qui peut à terme entraîner des périodes de restriction plus importantes.

L'objectif du projet était de disposer d'un outil robuste d'analyse de l'état de fonctionnalité des forêts dans les PPCE (correspondant à l'intégralité des bassins versants en considérant le captage d'eau comme point d'exutoire), pouvant être utilisé pour alerter les collectivités et les gestionnaires sur la nécessité de protéger ou restaurer les forêts de ces périmètres.

### 1.3.3 Méthode de réalisation du diagnostic

La démarche entreprise par le WWF propose de définir la fonctionnalité de l'écosystème forestier en rapport avec la perte de services écosystémiques relatifs à la qualité et quantité disponible de l'eau, sur l'ensemble de la Grande Terre et l'île des Pins. Les services considérés sont la stabilisation des sols, le service de tampon hydrique et de résilience aux incendies. Au vu des données existantes sur le territoire, 3 indicateurs ont été identifiés pour renseigner ces différentes pertes de services écosystémiques : l'aléa érosif, la tendance paysagère, et la fragmentation forestière.

**L'aléa érosif** est caractérisé par les pertes en sol par érosion hydrique selon le modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation : équation révisée de perte de sol), réalisé par l'Université de Nouvelle Calédonie. A partir de la distribution statistique des valeurs de perte en sol et de références bibliographiques, 4 classes d'aléa érosif ont été définies : faible, modéré, fort, extrême. Le pourcentage de chaque classe au sein du PPCE a ensuite été déterminé et l'importance relative de chaque classe a permis de caractériser l'aléa érosif à l'échelle du PPCE selon les règles de décision définies.



Figure 4: Arbre de décision de calcul de la fonctionnalité d'un bassin versant. Tendance paysagère 1 : milieu dominé par des formations arborées et arbustives ; Tendance paysagère 2 : mosaïque de formations arbustives et herbacées prédominantes avec présence de sols nus ; Tendance paysagère 3 : milieu ouvert avec présence importante de sols nus, dont la végétation majoritaire est éparse et herbacée

Cette méthode innovante va faire l'objet d'une publication dans *Journal of Environment*. Une présentation plus détaillée des différents critères est présentée en Annexe 2.

### 1.3.4 Limites de l'étude

Cette étude, basée sur des modèles existants établis via des méthodes de télédétection, présente quelques limites :

- Les pertes de sols du modèle RUSLE sont basées sur un modèle qui n'a pas encore été calibré par des mesures de terrain,
- La dégradation du sous-bois par l'abrutissement des cerfs et cochons, qui peut être importante en Nouvelle Calédonie, n'est pas déterminable par analyse d'images satellites,
- Il existe des marges d'imprécision des classes d'occupations du sol de la DTSI, qui date par ailleurs de 2008, mais l'actualisation 2018 devrait pallier à ce problème,
- Enfin, les trois paramètres ne sont pas totalement indépendants car le modèle RUSLE prend en compte la couverture de sol.

### 1.3.5 Résultats et perspectives

Comme présenté sur la carte ci-dessous, les résultats du diagnostic réalisé en 2016 montrent que 90 % de la surface des PPCE est estimée comme dégradée (37 %) voire très dégradée (53 %) sur l'ensemble de la Grande Terre et de l'Île des Pins. Seule 10% de la surface des PPCE est considérée comme peu dégradée. Trois secteurs particulièrement dégradés ont été mis en évidence, correspondant à trois grands centres peuplés : Dumbéa (99,2 % de bassins versants très dégradés), Bourail (87 %) et la zone Voh-Koné-Pouembout (entre 85 et 95 %). Ces secteurs ont été touchés par de nombreux incendies et parfois par l'exploitation minière, ce qui peut expliquer la dégradation des forêts.

Les petits PPCE (moins de 100 ha) présentent majoritairement un état de fonctionnalité très dégradé, les PPCE de taille moyenne (100 à 200 ha), sont pour moitié très dégradés, et les états de fonctionnalité sont plus distribués pour les PPCE de grande taille.

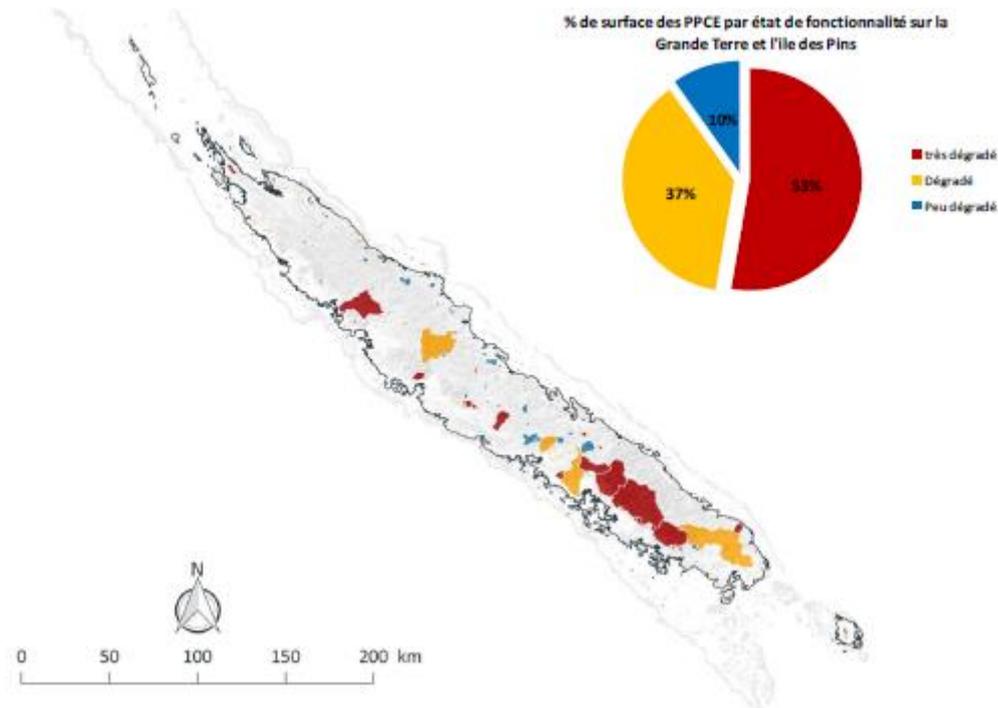


Figure 5 : Résultats du diagnostic de 2016

Les résultats de l'étude ont été présentés auprès des organismes et institutions concernés par la gestion de l'eau, par les questions d'aménagement des territoires et par la réduction des menaces : Mairies, Conseils de l'Eau, Comités de gestion, Provinces et Gouvernement. Ce diagnostic, mis à disposition des collectivités constitue un outil d'aide décisionnel important. Il permet de cibler des secteurs d'intervention prioritaire, de suivre l'état de fonctionnalité des périmètres de protection des eaux et donc d'améliorer à terme la protection de la ressource.

Une actualisation du diagnostic à partir d'images satellites de 2017-2018 est actuellement en cours sur toute la Grande Terre, et va également être étendu aux îles Fidji, au Vanuatu, et à Wallis et Futuna.

## 1.4 OBJECTIF DU STAGE

La problématique de l'étude est de confronter les résultats du diagnostic PPCE à la réalité de terrain en termes de qualité et de disponibilité en eau, c'est-à-dire de déterminer si la dégradation de la fonctionnalité du couvert forestier dans le PPCE se traduit par une dégradation de la qualité et la disponibilité en eau au niveau du captage. Un autre axe de réflexion serait de déterminer quels surcoûts de gestion de l'eau sont engendrés par la dégradation du couvert forestier.

### 1.4.1 Observations de terrain

Des observations sur le terrain pour deux sites pilotes du WWF vont dans le sens d'un lien effectif entre l'état de fonctionnalité du PPCE et l'approvisionnement en eau potable.

Le captage superficiel de Gohapin (commune de Poya), dont le PPCE a été diagnostiqué comme peu dégradé, et à dominante forestière, permet d'approvisionner la tribu de 750 habitants toute l'année, et ne présente pas d'apports terrigènes importants suite à de fortes précipitations, ni d'engrèvement de la retenue.

En revanche, le PPCE de la Dumbéa, diagnostiqué comme très dégradé, et ayant subi des incendies importants en 2005, 2007 et 2009 ainsi qu'un passif d'exploitation minière, présente un sol nu dominant, et une pollution terrigène importante. Comme présenté sur la Figure 6 ci-dessous, la retenue du barrage a perdu plus d'un tiers de son volume utile en 35 ans, dont 11 % entre 2007 et 2012, qui correspond à une période de gros incendies successifs. Pour répondre aux besoins du Grand Nouméa estimés à l'horizon 2030, le « Grand tuyau » a été construit et achemine de l'eau depuis un champ captant de forages sur la plaine alluviale de la Tontouta (à 40 km de Nouméa).

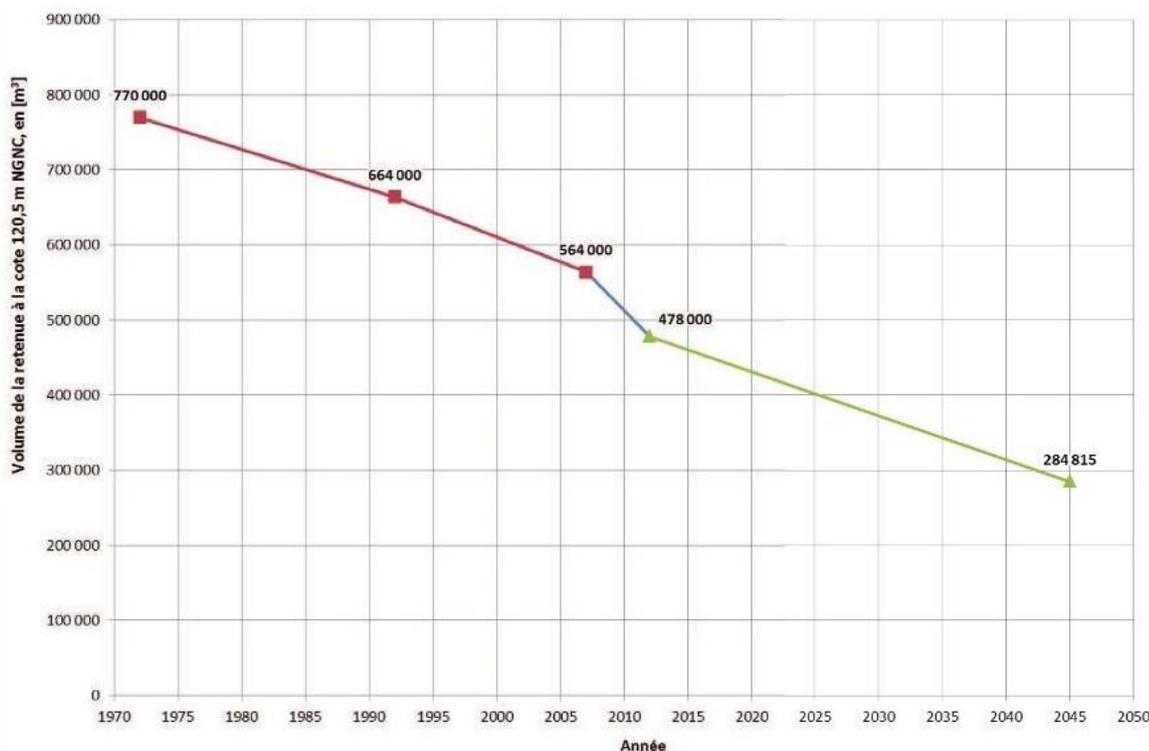


Figure 6 : Evolution du volume utile du barrage de la Dumbéa au cours du temps, source : Calédonienne des Eaux

### 1.4.2 Objectifs de l'étude

Dans la lignée de l'établissement du diagnostic PPCE, la prochaine étape de l'étude, qui fait l'objet du présent rapport de stage, consiste premièrement à confronter les résultats de ce diagnostic, avec les dysfonctionnements des PPCE observés sur le terrain, pour déterminer si une corrélation statistiquement significative existe entre les deux. Au total, environ 200 PPCE sont amenés à être étudiés, une trentaine de communes, selon le taux de réponse des organismes. Puis des éléments de chiffrage du service écosystémique rendu par les forêts pour la ressource en eau en Calédonie pourraient être proposés.

Pour cela, plusieurs missions ont été définies :

- Une revue de la littérature scientifique sur les services écosystémiques rendus par les forêts pour la ressource en eau.
- L'analyse statistique et géographique des relations entre perturbation des captages et dégradation des forêts nécessitant notamment :
  - o La recherche des indicateurs de dysfonctionnement de l'approvisionnement en eau. L'étude porte uniquement sur les captages superficiels ou forages ayant un PPE officiel en 2017.
  - o La collecte de données auprès des détenteurs : Les valeurs de ces indicateurs seront récoltées auprès des mairies des communes.

- La constitution d'une base de données.
- L'analyse statistique à proprement parler à la recherche de corrélations.
- La détermination du coût du service écosystémique rendu par les forêts pour la ressource en eau.

## **2 REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LA FORET POUR LA RESSOURCE EN EAU**

Les services écosystémiques sont définis comme étant les bénéfices que les êtres humains tirent du fonctionnement des écosystèmes. Cette notion a été popularisée dans le rapport Millenium Ecosystem Assessment rédigé en 2005 à la demande de l'Organisation des Nations Unies, qui avait pour objectif d'évaluer les conséquences des changements écosystémiques sur le bien-être humain, et d'établir la base scientifique pour mettre en œuvre les actions nécessaires à l'amélioration de la conservation et de l'utilisation durable de ces systèmes (MEA, 2005).

Quatre types de services écosystémiques ont ainsi été définis :

- Le service d'approvisionnement pour l'homme : nourriture, eau potable, bois...
- Le service de régulation : du climat, de l'eau, de l'érosion, permettant de maintenir un environnement favorable aux êtres humains,
- Les services culturels : récréatifs, esthétiques, intellectuels, culturels,
- Le service d'auto-entretien : services nécessaires à la production d'autres services comme la production primaire, le cycle des nutriments et la formation des sols.

### **2.1 DEFINITION DES SERVICES RENDUS PAR LA FORET POUR LA RESSOURCE EN EAU**

Les écosystèmes forestiers prodiguent des services écosystémiques en tant que ressource en bois, réserve de biodiversité, pour le stockage de carbone, l'usage récréatif, mais aussi pour la ressource en eau. Une brève revue de l'action déterminante qu'exercent les couverts végétaux sur le cycle de l'eau est présentée ci-dessous. Le rôle des forêts dans la régulation de la quantité, et la qualité de l'eau a été largement étudié, bien que certaines zones d'ombre persistent.

#### **2.1.1 Influence sur le cycle de l'eau**

En forêt, le cycle de l'eau est impacté par les particularités du couvert forestier. Au cours d'un évènement pluvieux, différents phénomènes, illustrés sur la Figure 7, influencent le bilan quantitatif de l'eau arrivant au sol, parmi lesquels :

- L'interception d'une partie des précipitations par le feuillage de la canopée (qui décroît quand l'intensité et la durée de la pluie augmente),
- L'infiltration de l'eau dans le sol après l'écoulement le long du tronc, et le stockage de l'eau dans le sol, dans les porosités créées par le système racinaire, et dans les litières riches en matières organiques, à forte capacité de rétention,
- Les écoulements souterrains et sub-surfaciques favorisés par la décompaction du sol et permettant l'alimentation des nappes et des cours d'eau,
- L'évapotranspiration permettant de restituer une partie de l'eau à l'atmosphère.

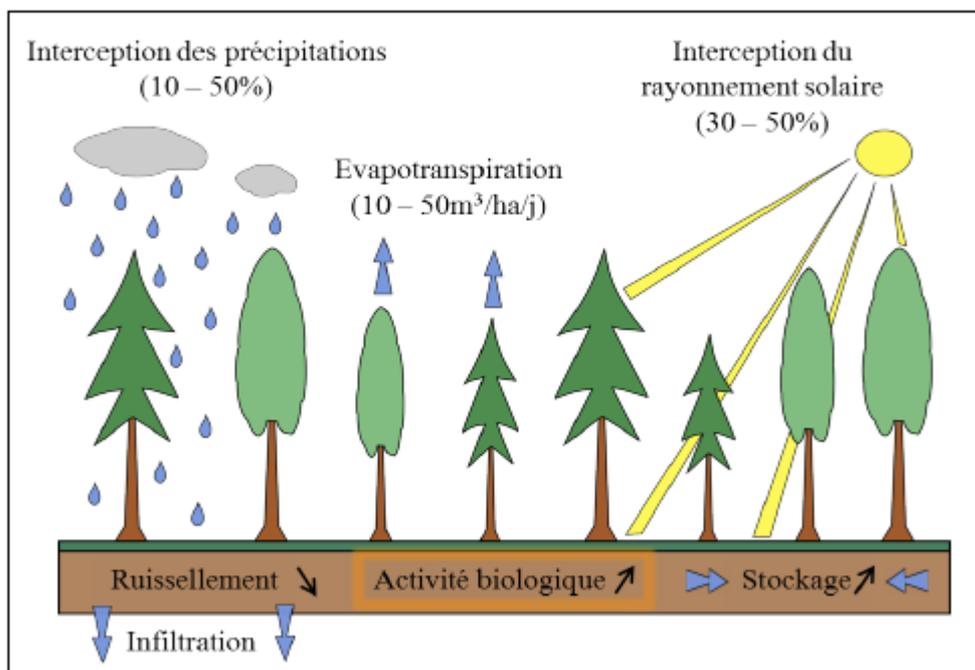


Figure 7: Schéma simplifié du cycle de l'eau (source : Thüler, 2014)

La forêt agit donc comme régulateur du cycle de l'eau en limitant l'arrivée d'eau au sol et son ruissellement, ce qui sera plus détaillé par la suite, et en favorisant le stockage de l'eau dans le sol et les nappes souterraines, via la création de sols poreux et riches en activité biologique, ainsi que sa restitution en période sèche.

### 2.1.2 Protection contre l'érosion hydrique

Le couvert forestier dans les bassins versants permet de limiter l'érosion hydrique due au ruissellement de surface, un processus naturel qui peut cependant avoir de graves conséquences en aval. Cette protection mécanique s'effectue grâce à deux phénomènes : une réduction de « l'ablation du substrat » et une rétention des sédiments érodés à l'amont (Rey *et al.*, 2003). Cette protection de l'ablation des sols s'effectue par interception des gouttes de pluies par le couvert aérien et réduction de « l'effet splash » par la litière. L'infiltration de l'eau dans le sol est également favorisée, plus que par une autre occupation du sol (Giordano, 1994). Les sols forestiers, plus poreux, permettent l'infiltration de plus grandes quantités d'eau, diminuant ainsi le ruissellement de surface. L'efficacité de la diminution du ruissellement est cependant limitée lors d'épisodes pluvieux longs et intenses, du fait d'une saturation du sol.

La cohésion du sol est renforcée grâce aux systèmes racinaires des arbres, et les végétaux constituent une barrière permettant de retenir les sédiments dans le bassin versant. Enfin, le rôle de protection thermique des forêts permet de réduire les écarts de température responsables de la gélifraction. En France métropolitaine, de boisements massifs ont d'ailleurs été réalisés par les services de « Restauration des terrains en montagne » (RTM), pour stabiliser et protéger les sols contre l'érosion (ONF, 2010).

Notons que l'influence du couvert forestier peut dépendre de sa densité, des espèces végétales présentes, et de leur répartition sur le bassin versant, car la production sédimentaire ne varie pas de manière linéaire avec le taux de couverture végétale. Par exemple, Ionesco, cité dans la publication de Rey (Rey *et al.*, 2003), a déterminé qu'en dessous de 70% de couverture végétale, l'eau ruisselait en grande partie, mais que la répartition de la végétation (homogène ou en plaque) pouvait maintenir un ruissellement diffus ou au contraire

favoriser sa concentration. La figure ci-dessous permet de comparer les taux d'érosion en fonction de l'occupation des sols.

Tableau 1: Taux d'érosion en fonction de l'occupation des sols (Bryant et al., 1998)

<b>Classification de l'occupation des sols</b>	<b>Taux relatif d'érosion</b>
Forêt de feuillus sempiverente	1,0
Forêt de conifères sempiverente	1,5
Forêt de feuillus à feuilles caduques	2,0
Forêt arbustive fermée	4,0
Forêt arbustive ouverte	5,0
Savane arbustive	6,0
Savanes	8,0
Zones humides permanente	8,0
Terres cultivées	12,0
Prairies	12,5
Zones urbanisées	21,0
Végétation aride/clairsemée	21,0

### 2.1.3 Influence sur les débits d'étiage et les crues

La connaissance du rôle hydrologique des forêts, notamment sur les débits annuels, les étiages et les crues étant encore imparfaite, on peut trouver plusieurs affirmations contraires dans la littérature sur ces sujets selon les conditions de réalisation des études, les résultats sont donc valables seulement très localement (Cosandey, 2004).

La revue d'Andreassian de 2004, compile les résultats obtenus aux Etats-Unis, pour 113 bassins versants appariés d'une surface inférieure à 1 km<sup>2</sup>, étudiés par une trentaine de chercheurs. D'après la synthèse de ces résultats, le couvert forestier se caractérise par une évapotranspiration plus importante qu'un autre couvert, et puise une quantité plus importante d'eau dans le sol en période sèche notamment, et aurait donc tendance à réduire les débits annuels ainsi que les débits d'étiage. Cependant, un test de transfert de ces résultats à des grands bassins versant, n'a pas permis de mettre en évidence de lien entre l'évolution du couvert forestier et l'évolution du comportement hydrologique dans les 35 bassins versants étudiés (Andreassian, 2004).

Pourtant, on pourrait aussi avancer que, la forêt améliorant la structure du sol et donc l'infiltration de l'eau dans le sol, elle permettrait un meilleur stockage de l'eau dans les nappes qui constituent un soutien aux étiages des cours d'eau (Cosandey et Robinson, 2002 ; Forestry Commission, 1993). Les résultats présentés par Cosandey montrent qu'il faut nuancer les affirmations selon lesquelles la forêt réduit les débits d'étiage, en fonction du type de forêt, du type d'occupation du sol avec laquelle on compare le débit, et du type de nappe considéré (Cosandey et Robinson, 2002).

Concernant les crues, la forte capacité d'infiltration des sols forestiers, ainsi que la limitation du ruissellement permettraient d'écarter les crues, réduire leur intensité et limiter le transport de sédiments. En effet, le temps d'écoulement des pluies d'orages augmente jusqu'à 500 fois en forêt par rapport aux sols nus (Giordano, 1994). Le seuil minimal de pluie nécessaire pour obtenir un ruissellement augmente également, ce qui de manière logique réduit la fréquence des crues. La déforestation d'un bassin versant accroît les pics de crues ainsi que

les volumes d'eau écoulés (Andreassian, 2004). Ce rôle atteint cependant ses limites en cas d'évènements extrêmes, quand le sol est saturé (Rey *et al.*, 2006).

Cependant, la quantification de ces effets est extrêmement variable selon la taille du bassin versant, les conditions pédologiques et climatiques considérées, les activités anthropiques, les essences présentes, l'âge du peuplement de la forêt... Le rôle de la forêt dans la variation des débits d'étiages et de crues ne semble donc pas généralisable.

#### 2.1.4 Lien entre forêts et qualité de l'eau

La présence d'un couvert forestier dans les bassins versants ou à proximité des cours d'eau, agissant comme un filtre naturel pour les éléments polluants issus des effluents et intrants agricoles, permet une amélioration de la qualité de l'eau par rapport aux autres occupations du sol. D'après une étude citée dans la publication de Dufour et Piégay, menée sur 14 sites dans 7 pays européens, la ripisylve permet de diminuer de 5 à 30 % la teneur en azote, tout type de végétation confondu (Dufour et Piégay, 2006). Cela pourrait même réduire les coûts de traitement de l'eau et donc le prix global de l'eau pour le consommateur (Abildtrup *et al.*, 2011). La forte activité biologique dans les sols forestiers permet également une meilleure dégradation des substances polluantes. Les cycles biogéochimiques sont donc influencés par la forêt (Dufour et Piégay, 2006).

La protection des sols, détaillée précédemment, permet, enfin, de réduire les apports sédimentaires au cours d'eau et donc la turbidité de l'eau.

Ces spécificités du cycle de l'eau en forêt conduisent toutes à une même conclusion : l'écosystème forestier agit comme régulateur du cycle de l'eau. L'eau drainée sous couvert forestier, vers les cours d'eau, les sources ou les nappes, est en règle générale de bonne qualité et peut être considérée comme un service écosystémique de premier plan, tout comme l'approvisionnement en eau en quantité suffisante toute l'année. Une dégradation de ce couvert (coupes, incendies...) pourrait donc menacer directement la ressource en eau nécessaire pour différents usages, dont l'eau potable.

### 3 ANALYSE STATISTIQUE : MATERIEL ET METHODE

Le premier objectif était d'établir une base de données regroupant pour chaque captage utilisé pour l'AEP (Adduction en eau potable), les données relatives à l'état de fonctionnalité de la forêt, calculées lors du diagnostic PPCE, et les données relatives aux dysfonctionnements au niveau des points de captages. Une liste d'indicateurs pertinents a donc été établie à partir de la littérature, puis les valeurs de ces indicateurs ont été récoltées via plusieurs sources.

Au final, deux bases de données différentes ont été créées : une base relative à la qualité de l'eau au niveau des captages, et une relative aux risques identifiés par les communes pour chaque captage. Seuls les captages superficiels et les tranchées drainantes, pouvant être assimilés d'après la DAVAR ont été conservés car les forages et sources sont moins sujets aux risques de pollution terrigène. La construction de ces bases, qui reposent sur des sources de données différentes sera détaillée ci-dessous, ainsi que les méthodes statistiques d'analyse des résultats utilisées.

La seconde partie de l'étude consistait à proposer un chiffrage du service écosystémique rendu par les forêts dans les PPCE pour la ressource en eau.

Les limites posées par les analyses statistiques et le manque de données à l'échelle de l'île ont nécessité d'orienter le rapport avec une proposition de protocole d'obtention de données adéquates, ainsi qu'une réflexion sur la mise en place d'un observatoire de la qualité de l'eau en Nouvelle Calédonie.

#### 3.1 LIEN ENTRE FONCTIONNALITE DU COUVERT FORESTIER ET LA QUALITE ET LA DISPONIBILITE EN EAU : CREATION DES BASES DE DONNEES

L'objectif étant de tester la relation entre la qualité de l'eau au niveau du captage, et l'état de fonctionnalité du couvert forestier dans le périmètre de protection du captage, la première étape a été de choisir les indicateurs de dysfonctionnement des captages qui pourraient être dû à l'état de la forêt dans le bassin versant.

Les indicateurs suivants ont été choisis dans un but de cohérence avec les services écosystémiques pris en compte dans le diagnostic PPCE (service de stabilisation des sols et de tampon hydrique notamment). Une présentation du paramètre, les hypothèses associées, la source et finalement le choix ou non du paramètre seront proposés.

##### 3.1.1 Détermination des paramètres à tester/ variables actives

###### 3.1.1.1 Matières en suspension/turbidité

Une conséquence directe de la perte du service de stabilisation des sols pourrait être une augmentation du transport des sédiments vers les cours d'eau due à l'intensification du ruissellement. Ces sédiments peuvent s'accumuler et diminuer la capacité des retenues et des réservoirs au niveau des captages, élever le lit des rivières, et altérer la qualité de l'eau car les particules peuvent servir de support à divers agents pathogènes, et réduire l'efficacité des traitements de désinfection de l'eau (Lechevallier *et al.*, 1980). Ce phénomène peut être quantifié par des mesures de matières en suspension et/ou de turbidité.

**Les matières en suspension** sont constituées d'un mélange de particules insolubles de limons, d'argile, de matière organique et de microorganismes invisibles à l'œil nu, maintenus en suspension dans la colonne d'eau.

**La turbidité** désigne la réduction de la transparence d'un liquide, due à la présence de matières colloïdales et/ou en suspension. Elle dépend de la taille, de la forme et de l'indice de réfraction des particules et n'est

donc pas corrélée de manière linéaire à la quantité de matières en suspension même s'il existe une relation forte entre les deux (Hannouche *et al.*, 2011).

#### Hypothèse

On peut émettre l'hypothèse que les quantités de matières en suspension et la turbidité suite aux précipitations seront plus importantes pour les captages dont les PPE sont en état de fonctionnalité dégradé à très dégradé.

#### **3.1.1.2 Quantité de métaux lourds : Nickel et Chrome**

Comme expliqué dans la partie bibliographique, les sols issus de substrats ultramafiques sont très riches en métaux lourds de type Nickel, Chrome, Cobalt et Manganèse, ce qui constitue une source potentielle d'exposition de la population calédonienne à ces éléments, notamment à proximité des zones où le couvert végétal est dégradé voire absent. Ils sont donc susceptibles de se retrouver entre autres dans l'eau des creeks (terme employé en Calédonie pour désigner les petits cours d'eau/ruisseaux) et de contaminer les captages d'eau. Ils peuvent également devenir toxiques à forte concentration ou ingestion chronique (CNRT Nickel, 2016, 2017).

Il serait donc intéressant de tester si les eaux exutoires des bassins versants ultramafiques « très dégradés » sont plus riches en métaux que les autres. Le Cobalt n'étant pas suivi par les communes, et seuls le Nickel et le Chrome faisant l'objet de limites « impératives » selon les recommandations de la DASS (de 50 µg/L), ils ont été conservés (le manganèse ne faisant l'objet que d'une limite « indicatrice »).

#### Hypothèse

On pourrait de même que pour les MES, émettre l'hypothèse que les quantités de Chrome et Nickel dans les eaux des captages en aval de bassins versants ultramafiques augmentent avec le niveau de dégradation.

#### **3.1.1.3 Fréquence d'entretien du captage**

L'augmentation des apports terrigènes suite à de fortes précipitations peut entraîner un engravement des retenues d'eau des captages superficiels, ou de la chambre de captage, ce qui peut diminuer le volume utile des retenues, voire empêcher l'entrée d'eau, et nécessiter un entretien de la part de la commune.

#### Hypothèse

La fréquence de nettoyage voire de curage des captages, aurait tendance à être plus importante pour des captages dont les bassins versants sont « dégradés » à « très dégradés ».

La fréquence d'entretien des captages a été demandée aux services techniques des communes, cependant, il est rapidement apparu que, certains captages étant inaccessibles après des événements pluvieux importants, on ne constate pas forcément d'augmentation de la fréquence de nettoyage. Ce paramètre n'a donc pas été retenu pour l'étude statistique.

#### **3.1.1.4 Fréquence des pénuries d'eau**

Des coupures d'eau peuvent survenir lors du colmatage des captages par les sédiments, ou lors des étiages sévères. Par exemple, les fortes précipitations de janvier 2018 ont entraîné une coupure de l'adduction pour plusieurs captages de Koné et les communes de Poum, Voh, Koné, et Pouembout ont été soumises à des restrictions d'eau au cours des périodes sèches de 2017, ainsi que l'Île des Pins en 2015. Cela peut être dû à une diminution du niveau d'étiage des cours d'eau (80 % des prélèvements étant effectués sur des eaux de surface), ou du niveau des nappes phréatiques.

### Hypothèse

On pourrait supposer que les coupures d'eau sont plus fréquentes dans les bassins versants dégradés. Concernant les pénuries en cas de sécheresse, on sait que le rôle de la forêt dans le soutien aux débits d'étiage n'est pas généralisable mais on pourrait tout de même tester cette hypothèse.

Ce paramètre a été demandé aux services techniques des communes mais pour la plupart des captages, un maillage avec d'autres unités de distribution ou avec des forages permet d'utiliser des ressources de secours, évitant ainsi la constatation de pénuries, ce qui camoufle le manque de ressource individuelle. Ce paramètre n'a donc pas non plus été pris en compte pour l'étude statistique.

#### **3.1.1.5 Probabilité d'occurrence de turbidité suite à de fortes pluies, et de manque d'eau à l'étiage**

Toutes les communes sont dotées d'un Plan de Sécurité Sanitaire des Eaux (PSSE), qui constitue un outil de gestion opérationnel préconisé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), destiné à la gestion préventive globale de la qualité de l'eau potable, du captage au consommateur par la mise en œuvre de bonnes pratiques d'exploitation (DASS). Ce dossier est élaboré par une équipe communale constituée de membres de divers horizons (élus, employés du service technique, fontainiers, service comptabilité etc...) avec l'assistance d'un agent de la DASS. Il regroupe des précisions techniques sur le fonctionnement de chaque unité de distribution de la commune, les risques sanitaires identifiés de la ressource au consommateur, les recommandations de la DASS en termes de fréquence d'entretien des installations et d'analyses chimiques, ainsi qu'un programme d'améliorations à prévoir. Les communes ne sont cependant pas tenues de suivre les recommandations et préconisations.

Lors de l'étape d'identification des risques sanitaire, l'équipe de rédaction doit considérer tous les événements dangereux qui peuvent être associés aux unités de distribution de la commune depuis la ressource jusqu'au robinet. Chaque risque est caractérisé par la fréquence d'occurrence (notée de 1 à 5), déterminée par des observations historiques au niveau de la ressource, et la gravité de ses conséquences (notée de 1 à 5), la multiplication des 2 donnant une note globale sur 25. Les risques de turbidité suite à de fortes précipitations, et de manque d'eau en période d'étiage font partie, entre autres, des risques possibles mentionnés dans les PSSE de certaines communes. Le détail de la caractérisation des risques est présenté en Annexe 3. Seules les notes portant sur la fréquence d'apparition de la turbidité et du manque d'eau à l'étiage ont été utilisées.

### Hypothèse

On pourrait supposer que ces paramètres sont corrélés de manière positive avec la dégradation de la forêt dans le PPE.

### Limites

Ce niveau de risque est établi de manière arbitraire par la commune, la DASS ayant peu d'influence sur leur détermination. Ils restent donc subjectifs, et leur appréciation peut varier d'une commune à l'autre. Ces paramètres ont cependant été conservés pour l'étude statistique car ils donnent une bonne idée des menaces pesant sur la ressource pour chaque unité de distribution, et pourraient révéler des tendances.

Le but de l'analyse statistique est d'étudier le lien entre les variables proposées ci-dessus, les variables relatives à la fonctionnalité des PPCE calculées par le bureau d'étude BLUCHAM, et les variables relatives aux caractéristiques du bassin versant, qui peuvent également influencer la réponse hydrologique à des perturbations.

### 3.1.2 Variables explicatives relatives à la fonctionnalité du couvert forestier

Les principales variables utilisées pour effectuer le diagnostic PPCE sont présentées ci-dessous.

#### Variables quantitatives :

- Pourcentage des différentes classes d'érosion
- Pourcentage des différentes classes d'occupations du sol
- Indices de forme et de diversité et variables ayant permis leur calcul

#### Variables qualitatives :

- Aléa érosif
- Tendance paysagère
- Fragmentation
- Fonctionnalité

### 3.1.3 Variables explicatives relatives aux caractéristiques du bassin versant

Les caractéristiques de la forêt et la qualité de l'eau au captage peuvent être liées à d'autres variables physiques, qu'il est apparu important d'intégrer à l'analyse statistique.

#### **3.1.3.1 Le type de substrat**

Comme présenté dans la partie introductive, la géologie de la Nouvelle-Calédonie est partagée entre deux formations principales : un substrat ultramafique (péridotites) friable et sensible à l'érosion, et un substrat volcanosédimentaire.

#### Hypothèse

On peut supposer que le type de substrat aura une influence sur la quantité de métaux lourds présente dans l'eau, et éventuellement sur les capacités de rétention d'eau et de restitution en période sèche.

La géologie a été déterminée lors du diagnostic par le bureau d'étude BLUECHAM, sous forme de la proportion (%) de chaque substrat par bassin versant.

#### **3.1.3.2 La pente moyenne du BV**

En Nouvelle Calédonie, la chaîne centrale est composée de petits bassins versants à forte pente, et aux transferts hydriques très courts. La pente du terrain affecte donc le temps de conservation de l'eau et la durée ainsi que la vitesse de son écoulement.

#### Hypothèse

on pourrait supposer que plus la pente est importante, plus on retrouvera de MES, turbidité, Nickel et Chrome dans l'eau après de fortes précipitations.

#### **3.1.3.3 L'altitude du captage**

Comme nous l'avons dit précédemment, les forêts humides préservées sont essentiellement situées dans les bassins versants de la chaîne centrale, en altitude, car moins accessibles.

### Hypothèse

on pourrait supposer que plus l'altitude est importante, moins on retrouvera de MES, turbidité, Nickel et Chrome dans l'eau après de fortes précipitations.

#### **3.1.3.4 L'hydro-éco-région**

La Nouvelle Calédonie compte 6 HER : zones homogènes vis-à-vis des précipitations, du relief et du climat : au sein d'une même entité, les cours d'eau présentent des caractéristiques communes en termes de fonctionnement écologique, de peuplement, et d'évolution amont-aval.

#### **3.1.3.5 Surface du bassin versants**

La surface du bassin versant va en partie déterminer la quantité d'eau à l'exutoire.

### Hypothèse

Comme la quantité d'eau drainée augmente avec la surface du bassin versant, on pourrait supposer que l'apparition d'un effet de dilution, et donc une diminution des quantités de nos variables.

#### **3.1.3.6 Cumul de précipitations**

Les analyses ayant été effectuées à des dates différentes dans l'année, les conditions météorologiques ont pu varier, et expliquer les différences notamment de MES et turbidité qui ont tendance à être plus importantes suite à de fortes précipitations. De plus, certains captages n'étant pas accessibles suites à de fortes pluies, il est apparu essentiel d'intégrer la pluviométrie à la base de données.

Les stations météorologiques Météo France et les pluviomètres de la DAVAR les plus proches de chaque point de prélèvement ayant servi aux analyses ont été identifiés. Certains étant distants de plusieurs kilomètres, cette limite devra être prise en compte. Quand la station la plus proche présentait une différence d'altitude trop importante, elle a été remplacée par une station plus cohérente, de même, quand les données n'étaient pas disponibles, les valeurs de la deuxième station la plus proche ont été utilisées quand c'était possible. D'après la littérature, et sur les conseils d'hydrologues de la Calédonienne des Eaux, les temps de transferts hydriques dans les bassins versants calédoniens étant de quelques heures, à quelques jours, les cumuls de pluie (mm), 3 jours et 7 jours avant l'analyse seront testés.

### **3.1.4 Création de deux bases de données**

Après une demande officielle des analyses d'eau brute et des PSSE auprès des communes, il est apparu que les mairies ayant accepté de nous communiquer leurs analyses n'ont pas forcément pu nous fournir leur PSSE et inversement : les paramètres relatifs aux risques extraits des PSSE ont donc été regroupés dans une base de données à part. Deux bases de données différentes ont donc été créées : une base permettant de tester le lien entre la fonctionnalité du couvert forestier et la qualité de l'eau au niveau des captages, et une base permettant de tester le lien entre le couvert forestier et les risques pesant sur la ressource en eau, déterminé par les communes. Les variables explicatives déterminées précédemment sont communes aux deux bases de données.

### 3.1.5 Récapitulatif des variables utilisées

Tableau 2: Variables actives de la base de données

Nom de la variable	Contenu	Source
<b>Caractérisation de l'ouvrage (BDD 1&amp;2)</b>		
ID_unique_stage	Identifiant unique à l'étude	
COMMUNE	Nom de la commune	Analyses
TYPE_OUVRAGE	Captage, forage, tranchée drainante, source	Analyses
JOUR_PREL	Jour du prélèvement pour analyse	Analyses
MOIS_PREL	Mois du prélèvement pour analyse	Analyses
ANNEE_PREL	Année du prélèvement pour analyse	Analyses
LABO	Laboratoire ayant fait l'analyse	Analyses
LIBELLE_LIEU_PRELEVEMENT	Nom du captage sur l'analyse	Analyses
LIBELLE_DAVAR	Nom du captage dans la base de données DAVAR	DAVAR
X RGNC91	Latitude	DAVAR
Y RGNC91	Longitude	DAVAR
<b>Variables actives qualité de l'eau (BDD 1)</b>		
MES	Quantité de matières en suspension (mg/L)	
Turbidite	Turbidité (NFU)	Analyses communes
Ni	Quantité de Nickel ( $\mu\text{g/L}$ )	
Cr	Quantité de Chrome ( $\mu\text{g/L}$ )	
<b>Variables actives Risques PSSE (BDD 2)</b>		
R_occ_Turbidite	Probabilité d'occurrence du risque de turbidité suites à de fortes précipitations (0 à 5)	PSSE
R_occ_Manque	Probabilité d'occurrence du risque de manque d'eau en période d'étiage (0 à 5)	

<b>Variables explicatives bassin versant</b>		
HER	Hydro-Eco-Region (A,B,C,D,E,F,G)	DAVAR
sols_um	Pourcentage de sols ultramaïques [0;1]	BLUECHAM
sols_vs	Pourcentage de sols volcanosédimentaires [0;1]	BLUECHAM
ALT	Altitude de l'ouvrage de prélèvement (m)	Calcul QGIS
PENTE	Pente moyenne dans le bassin versant (degrés)	Calcul QGIS
<b>Variables explicatives diagnostic PPCE</b>		
ID_unique	Identifiant de l'objet	
Couche_res	Couche SIG correspondante	
AREA	Surface du bassin versant (m <sup>2</sup> )	
ER_FAI	Pourcentage de surface en érosion faible [0;1]	
ER_MOD	Pourcentage de surface en érosion modérée [0;1]	
ER_FOR	Pourcentage de surface en érosion forte [0;1]	
ER_EXT	Pourcentage de surface en érosion extrême [0;1]	
	<u>Classification de l'aléa érosif :</u>	
PRI_ER	1 : fort à extrême 2 : modéré à fort 3 : faible à modéré	
P_FORET	Pourcentage de surface en forêt [0;1]	
P_ARBU	Pourcentage de surface de formations arbustives et herbacées [0;1]	
P_EPARS	Pourcentage de surface de végétation éparse et sols nus [0;1]	B L
	<u>Tendance paysagère :</u>	U
PRI_OS	1 : tendance paysagère 1 2 : tendance paysagère 2 3 : tendance paysagère 3	E C
amax_foret	Aire de la plus grande forêt	H
atot_foret	Aire totale de la forêt	A
ptot_foret	Périmètre total de la forêt	M
nb_patch_f	Nombre total de patch de forêt	
dominance	Indice de dominance	
forme	Indice de forme	
diversite	Indice de diversité	
	<u>Fragmentation de la forêt :</u>	
PRI_FRAG	1 : forte à très forte 2 : modérée à forte 3 : faible à modérée	
PRIORCODE	Code de calcul de l'état de fonctionnalité : PRI_ERx100 + PRI_OSx10 + PRI_FRAG	
	<u>Etat de fonctionnalité du PPE :</u>	
Fonction	1 : très dégradé 2 : dégradé 3 : peu dégradé	
<b>Pluviosité (BDD1)</b>		
STAT_MET	Nom de la station météo la plus proche	DAVAR / METEOFRANCE
STATION	DAVAR ou METEO France	DAVAR / METEOFRANCE
DIST	Distance du captage à la station (m)	Calcul QGIS
J <sub>x</sub>	Cumul de pluie le jour x (J1 : jour de l'analyse, J2 = jour précédent etc...) (mm)	DAVAR / METEOFRANCE
CUMUL_PLUVIO_3J	Cumul de pluviométrie 3j avant le prélèvement (jour du prélèvement compris) (mm)	DAVAR / METEOFRANCE
CUMUL_PLUVIO_7J	Cumul de pluviométrie 7j avant le prélèvement (jour du prélèvement compris) (mm)	DAVAR / METEOFRANCE

### 3.1.6 Analyses statistiques

#### 3.1.6.1 Base de données qualité de l'eau

##### Effectifs

Quinze communes ont répondu favorablement, nous avons ainsi pu recueillir des analyses sur 126 ouvrages différents, soit 137 analyses au total (il peut y avoir plusieurs analyses par ouvrage). 92 analyses datent de 2017, ce qui correspond avec la version la plus récente du diagnostic effectué par BLUECHAM, effectué sur la base de l'occupation des sols de 2017 également. Pour 4 communes, regroupant 47 captages, des analyses d'eau datant de 2016 et 2015 ont également été utilisées, faute d'analyses plus récentes. Tous les paramètres choisis n'étant pas renseignés dans chaque analyse suivant le demandeur et le prestataire, le tableau ci-dessous récapitule les effectifs pour chaque paramètre, et la figure 11, la répartition des captages dont les analyses ont été recueillies.

Tableau 3: Effectifs de la base de données qualité de l'eau

	Effectifs				
	Total	MES	Turbidite	Ni	Cr
Captage	117	80	111	81	84
Forage	11	2	11	11	4
Source	3	3	3	3	3
TD	6	2	6	5	2
Total	137	87	131	100	93
NA	-	30	6	17	14

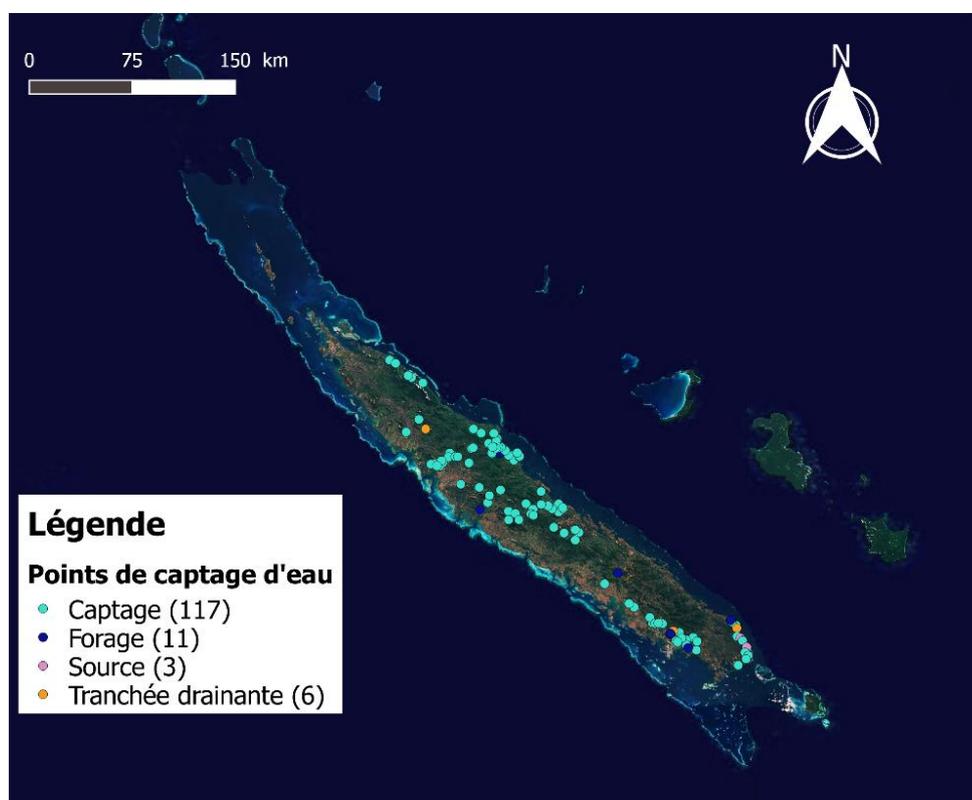


Figure 8: Répartition analyses recueillies

### Modifications apportées à la BDD

Concernant les MES et la turbidité, les limites de quantification de ces paramètres sont respectivement de 2 mg/L et 0.8 NFU. Les valeurs dans les analyses sont donc notées respectivement « <2 » et « <0.8 ». Ces valeurs étant considérées comme négligeables, elles ont été remplacées par « 0 » pour pouvoir être traitées statistiquement.

Les dates de toutes les analyses ont été comparées aux dates des surfaces brûlées déterminées par télédétection par l'CEIL de l'Environnement (satellite VIIRS). Tous les bassins versants considérés comme ayant connu un incendie entre la date de l'analyse de l'eau et la date des images satellites ayant permis d'effectuer le diagnostic ont été supprimés (9 points), pour que l'analyse d'eau corresponde à l'état de la végétation à la même date.

### Tableau des corrélations (variables quantitatives)

La corrélation de toutes les variables quantitatives sera testée, pour voir quelles variables explicatives sont les plus corrélées aux variables actives et entre elles. C'est la méthode de corrélation non paramétrique de Kendall, basée sur les rangs, qui est utilisée pour des variables ne suivant pas une distribution normale.

### Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple va permettre d'expliquer les variable actives par rapport à plusieurs variables quantitatives.

### Test de l'influence des facteurs (variables qualitatives)

L'influence des variables dites « explicatives » relatives à l'état de la forêt et aux caractéristiques du bassin versant sur les variables de qualité de l'eau a été testée par la méthode de la comparaison de moyennes non paramétrique. Elle s'effectue grâce au test de Kruskal-Wallis, permettant de comparer les distributions de plus de 2 échantillons, en s'affranchissant des hypothèses de normalité et d'égalité des variances.

### Analyse en Composantes principales (ACP)

La méthode de l'ACP permet de résumer de gros jeux de données, en mettant en évidence les liens entre les variables et les ressemblances entre individus.

#### **3.1.6.2 Base de données des risques identifiés dans les PSSE**

Les PSSE de 10 communes, rédigés entre 2015 et 2017 ont pu être consultés, correspondant à 82 captages d'eau potable. Comme expliqué en Annexe 4, le risque étant une multiplication de la fréquence par la gravité des conséquences de l'évènement, seule la valeur de la fréquence des risques de turbidité suite à des évènements pluvieux et de manque d'eau en période d'étiage a été extraite des PSSE et intégrée à la base de données.

Quand le risque n'était pas mentionné dans le PSSE, la probabilité d'occurrence « 0 » lui a été attribuée.

Ces variables étant quantitatives discrètes, le test de d'indépendance de Khi-deux a été effectué, ainsi que l'ACP et la classification.

Une comparaison graphique de la concordance entre les fréquences et les résultats du diagnostic a également été effectuée.

#### **3.1.7 Limites et réorientation**

Concernant la base de données regroupant les données de qualité de l'eau, la majorité des relevés s'étale entre mai et octobre 2017, ce qui correspond globalement à la saison sèche en Nouvelle Calédonie, ce qui rend moins évident l'interprétation du lien avec la forêt. De plus, une seule une analyse ponctuelle sur l'année a été utilisée,

ce qui est peu représentatif des conditions à l'année. L'idéal aurait été de pouvoir avoir des moyennes des différents paramètres (moyennes sur 30 valeurs minimum) sur l'année, relevés en saison sèche et en saison humide. Ce jeu de données ne se prête donc pas au mieux à la problématique étudiée. Les analyses prévues ont tout de même été effectuées car pourraient faire ressortir d'éventuelles tendances, mais les résultats obtenus seront à nuancer.

Concernant la base de données relative aux risques identifiés dans les PSSE, la détermination des risques ainsi que leur probabilité d'apparition étant totalement à l'appréciation des communes, ils peuvent-être surestimés ou sous-estimés par rapport à la situation réelle dans le bassin versant selon les communes. Il peut donc apparaître peu pertinent de comparer les risques entre les communes. De même l'analyse a toute de même été réalisée pour faire apparaître d'éventuelles tendances, les communes étant les mieux placées pour déterminer quels risques pèsent principalement sur leur ressource, en admettant que leur appréciation soit bonne.

Cependant, ce gros manque de données et le manque de robustesse à prévoir a nécessité une réorientation du sujet, et l'engagement d'une réflexion sur la mise en place d'un protocole permettant d'obtenir un jeu de données adapté pour répondre à la question de départ, ainsi qu'une réflexion sur la mise en place d'un observatoire de la qualité de l'eau à l'échelle de la Nouvelle Calédonie, qui seront présentés par la suite.

## 4 RESULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE

### 4.1 BASE DE DONNEES QUALITE DE L'EAU

#### 4.1.1 Résultats du diagnostic des bassins versants étudiés

Sur les 116 bassins versants différents diagnostiqués, répartis dans 15 communes, 61 % sont considérés comme « très dégradés », et 27 % comme « peu dégradés ». On constate une nette différence selon la géologie : les bassins versants sur substrats ultramafiques apparaissent plus dégradés que ceux sur substrat volcanosédimentaire d'après le tableau ci-dessous, ce qui est certainement dû à l'exploitation minière. La carte représentant le diagnostic pour les communes ciblées est présentée en Annexe 3.

Tableau 4 : Résultats du diagnostic

Fonction	Tout substrat	Substrat UM	Substrat VS
1	61%	79%	44%
2	12%	9%	15%
3	27%	12%	41%

#### 4.1.2 Corrélation entre le diagnostic et la qualité de l'eau

##### Matrice des corrélations (variables quantitatives)

La matrice des corrélations présentée ci-dessous a été établie grâce au test de corrélation non paramétrique de Kendall. Le premier tableau correspond aux coefficients de corrélations « Tau » des MES et de turbidité, calculés à partir de la base de données totale, et le deuxième à ceux du Nickel, du Chrome et de la turbidité calculés à partir de la base de données où seuls les points sur substrat ultramafique majoritaire ont été gardés (76 lignes). Seules les variables ayant donné un résultat sont regroupées dans lesx tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Matrices des corrélations de Kendall

	Turbidité	CumulJ7	ER_FAI	ER_MOD	P_ARBU	P_FORET	UM
MES	0,31**	0,22*	0,17	-0,21*	-0,21*	0,2*	-0,17
Turbidité	1	0,09	0,03	-0,17**	-0,08	0,01	-0,16*

	Turbidité	CumulJ3	CumulJ7	ER_FAI	ER_FOR	ER_EXT	P_EPARS	P_ARBU	P_FORET
Ni	0,22*	0,19*	0,35**	0,11	-0,26**	-0,06	-0,06	-0,04	0,06
Cr	0,20*	0,05	0,12	-0,41**	-0,05	0,41**	0,42**	-0,20**	-0,41**
Turbidité	1	0,08	0,11	-0,05	-0,08	0,14	0,15	-0,1	-0,09
	forme	diversite	amax_foret	atot_foret	ptot_foret	nb_patches	AREA	ALT	Pente
Ni	0,04	0,05	0,09	0,06	0,07	0,12	0,14	-0,13	-0,31**
Cr	-0,25**	-0,19**	-0,30**	-0,29**	-0,28**	-0,22*	-0,23*	-0,46**	-0,46**
Turbidité	0,08	0,14	-4,3.10 <sup>-3</sup>	9,5.10 <sup>-3</sup>	0,03	0,1	0,05	-0,23**	-0,23**

\* : p-value <5%, \*\* : p-value <1%

Malgré les corrélations apparemment significatives des MES avec certaines variables quantitatives, les données de cette variable sont trop pauvres pour pouvoir les valider. En effet, elle contient plus d'un tiers de « NA » et seulement 13 valeurs supérieures à 0 (sur 82), faisant suite à des épisodes pluvieux. De plus, la

moitié de ces valeurs non nulles, parfois très élevées sont obtenues pour des bassins versants considérés comme « peu dégradés », ce qui peut expliquer les corrélations observées.

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer l'apparition de pics de turbidité/MES suite à des précipitations, pour des bassins versants peu dégradés, ou l'absence de pics pour des bassins versants très dégradés :

- La pluviométrie n'est pas assez précise, les pluviomètres étant en moyenne à 5 km des captages,
- La pluviométrie journalière ne permet pas de distinguer un épisode pluvieux court et intense d'un épisode long et de faible intensité, ce qui peut constituer un facteur important lors des processus de sédimentation,
- Il existe certainement un seuil de déclenchement du ruissellement, propre à chaque bassin versant qui nous est inconnu,
- Un bassin versant déterminé comme « peu dégradé » peut avoir un sous-bois très dégradé, ou des plaques de sols nus en bordure de rivière, ce qui expliquerait la turbidité,
- Un bassin versant globalement très dégradé peut présenter des patches de forêt autour du captage, ce qui limiterait la turbidité.

La turbidité semble présenter une corrélation avec le substrat volcanosédimentaire ( $Tau = -0.16$ ) : en effet les plus fortes valeurs de la base de données sont obtenues sur ce genre de substrat. Le test de corrélation, appliqué sur substrat uniquement volcanosédimentaire a mis en évidence que la turbidité était positivement corrélée à la pluviométrie le jour de l'analyse ( $0,22^*$ ), et aux cumuls 3 jours ( $0,29^{**}$ ) et 7 jours ( $0,30^*$ ) avant, les pics de turbidité observés sont donc probablement dus aux précipitations plutôt qu'au type de substrat dans notre cas (ce qui n'exclut pas une influence du substrat sur les valeurs de turbidité, mais notre base de données ne permet pas de le montrer).

Sur substrat ultramafique, le Chrome et le Nickel semblent corrélés entre eux ( $tau = 0,17^*$ ) et tous les deux corrélés à la turbidité (respectivement  $0,21^*$  et  $0,22^*$ ).

Contrairement au Chrome, des fortes quantités de Nickel dans l'eau sont associées à des cumuls de pluie dans les 3 jours ou 7 jours précédant l'analyse, mais également à un faible pourcentage d'érosion forte, et une pente plus faible. Il est difficile d'interpréter cette corrélation négative ( $-0,26$ ) à la proportion d'érosion forte et non à l'érosion extrême.

Comme nous en avons émis l'hypothèse l'érosion semble avoir une influence sur la quantité de Chrome retrouvée dans l'eau : une érosion extrême est associée à des quantités plus importantes ( $Tau = 0,40$ ). La tendance paysagère semble également intervenir, des pourcentages accrus de formations forestières voire arbustives, et des patches forestiers de grande taille semblent être corrélés à des quantités plus faibles de chrome, contrairement au pourcentage important de sol nu et végétation éparse. Les variables de fragmentation semblent également corrélées : de faibles valeurs de forme et de diversité, qui peuvent caractériser des petits patches forestiers peu nombreux et homogènes correspondent à des fortes valeurs de Chrome.

Il semblerait enfin que les plus faibles valeurs de Chrome soient obtenues pour des grands bassins versants : ces derniers drainant plus d'eau, il pourrait y avoir une dilution de la quantité de Chrome. Des faibles valeurs sont corrélées à des captages d'altitude, à forte pente (ces deux dernières variables étant significativement corrélées). En effet, les bassins versants de la chaîne, plus élevés et plus pentus, sont mieux préservés de par leur inaccessibilité, on y retrouve donc des proportions plus importantes de forêts. On trouve notamment une corrélation significative entre altitude et forêt ( $tau = 0,26$ ,  $p\text{-value} = 9,7 \cdot 10^{-6}$ ) et entre altitude et pente ( $tau = 0,23$ ,  $p\text{-value} = 7,8 \cdot 10^{-5}$ ), mais pas entre pente et forêt ( $tau = 0,01$ ,  $p\text{-value} = 0,09$ ).

La corrélation ne signifie cependant pas forcément causalité, on peut donc aller plus loin avec la régression linéaire multiple, qui va nous permettre de déterminer les variables explicatives des quantités de Nickel et Chrome. Les coefficients étant significatifs mais restant faibles, on peut supposer qu'il existe d'autres phénomènes à l'œuvre, ou peut-être certaines variables non prises en compte.

#### Régression linéaire multiple

Des régressions linéaires multiples ont été testées sur le Chrome et le Nickel, afin de sélectionner les variables expliquant le mieux la variance. Cependant, l'étude graphique des résidus du modèle, présentée en Annexe 5 ne semble pas satisfaire les conditions d'indépendance, d'homoscédasticité et de normalité, requises pour la régression. Les résultats sont présentés en annexe, mais ne seront donc pas interprétés.

Si le test de Kendall a permis de mettre en évidence des corrélations entre le Chrome, le Nickel et certaines variables quantitatives, elles ne semblent pas linéaires, il n'est donc pas possible d'établir un modèle de prédiction de ces variables de qualité de l'eau en fonction des variables du diagnostic.

#### Comparaison de moyennes (variables qualitatives)

Au vu des résultats obtenus précédemment, la comparaison de moyennes a seulement été effectuée pour le Ni, le Cr, et la turbidité sur substrat ultramafique (67 observations pour le Cr), grâce au test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Le tableau suivant présente les variables qualitatives ayant une influence sur les variables actives, ainsi que les probabilités critiques (p-values) associées. Certaines variables quantitatives, dont les résultats de la corrélation de Kendall étaient significatifs, ont été regroupées en classes pour être intégrées à l'analyse. Ce test a permis d'établir des seuils d'augmentation significative des valeurs de Chrome et Nickel selon les variables. Les variables de fragmentation (forme, diversité, atot, amax, ptot) n'ont volontairement pas été divisées en classes mais évaluée par PRI\_FRAG. Les tests ont d'abord été effectués à partir des classes ayant pour bornes les seuils statistiques définis par BLUECHAM lors du diagnostic, puis modifiées pour déterminer les seuils les plus précis possibles. L'analyse a été réalisée sans le captage Bagha (commune de Boulouparis) dont le bassin versant a une surface de 478 km<sup>2</sup>, ce qui diffère trop de la moyenne générale et pourrait créer des biais.

Tableau 6 : Résultats de la comparaison de moyennes de Kruskal Wallis

Variables influençant le Ni	p-value	Classes différentes
CUMUL_PLUVIO_J3	8,5.10-3	<100 et >100
CUMUL_PLUVIO_J7	2,7.10-4	<250 et >250
Variables influençant la turbidité	p-value	Classes différentes
HER	1,9.10-3	B et E
Variables influençant le Cr	p_value	Classes différentes
ER_FAI	3,0.10-5	<10 et >40 // <10 et 10-40
ER_EXT	7,3.10-4	<18 et >75 // 18-75 et >75
P_EPARS	3,2.10-5	<11 et >70 // <11 et 11-70 // 11-70 et >70
P_ARBU	3,7.10-3	<30 et >40
P_FORET	1,7.10-5	<10 et >25 // 10-25 et >25
ALT	5,0.10-7	<100 et >170 // <100 et 100-170 // 100-170 et >170
PENTE	3,7.10-5	<20 et >30 // <20 et 20-30 // 20-30 et >30
AREA	4,3.10-3	<1 et >20 // <1 et 1-20
PRI_ER	2,3.10-2	1 et 3
PRI_OS	4,7.10-6	1 et 3 // 2 et 3
Fonction	1,2.10-3	1 et 2
HER	3,1.10-6	B et D // B et E // D et G

On retrouve les résultats mis en évidence lors des régressions linéaires : les valeurs de Nickel augmentant significativement à partir de 200 mm de précipitations cumulées dans les 3 jours avant l'analyse, et 250 mm dans les 7 jours précédents.

Les valeurs de Chrome augmentent significativement avec la proportion d'érosion extrême (particulièrement au-dessus de 75 %), la proportion de sol nu (particulièrement au-dessus de 70 %). Elles diminuent significativement en fonction de l'altitude, de la proportion de forêt (au-dessus de 25 %) et de l'aire du bassin versant (au-dessus de 1 km<sup>2</sup>). Les résultats sont présentés sous forme de boîtes à moustaches en Annexe 6.

Enfin, concernant les variables qualitatives, la quantité de Chrome augmente significativement entre un aléa érosif « faible à modéré » et « fort à extrême », entre une tendance paysagère « mosaïque de formations arbustives et herbacées » et « milieu ouvert avec présence importante de sols nus », et enfin entre un diagnostic global « dégradé » et « très dégradé ». Il n'y aurait apparemment pas de différence entre une tendance paysagère arbustive et forestière.

Les HER D (Plaines ultramafiques du Grand Sud) et E (massifs ultramafiques de la chaîne) présentent les quantités de Chrome les plus importantes par rapport aux plaines littorales du Grand Ouest (B). La HER E présente également des valeurs plus importantes de turbidité par rapport à la HER B.

#### Analyse en composante principale et classification

L'ACP et la classification ont été réalisées sur 67 observations des 20 variables quantitatives du diagnostic comme variables actives, le Cr, Ni et la turbidité en variables supplémentaires pour les positionner par rapport aux groupes de bassins versants identifiés, et les 5 variables qualitatives supplémentaires. Les résultats détaillés de l'ACP sont présentés en Annexe 7.

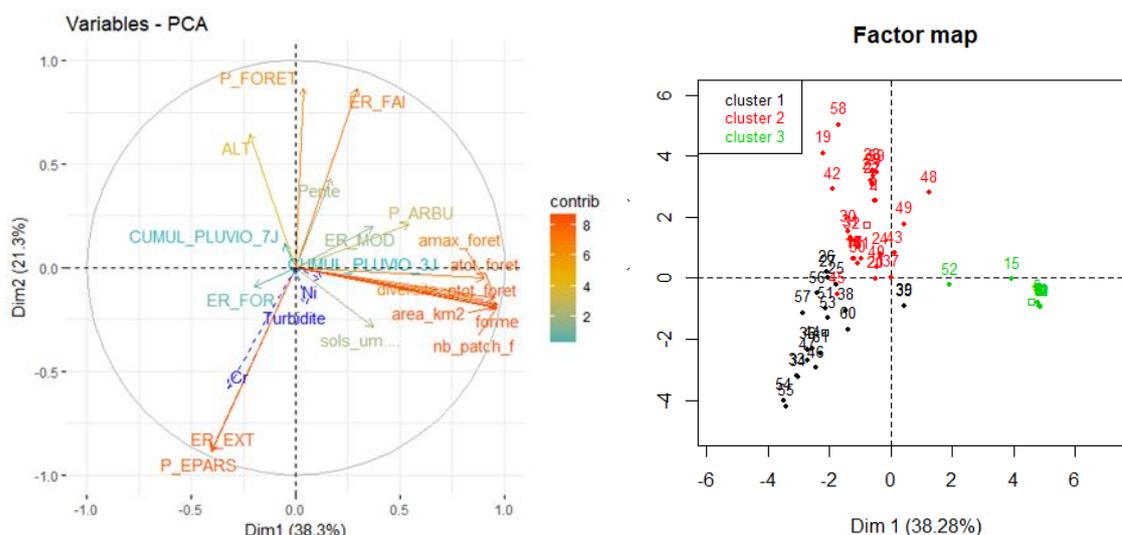


Figure 9: Cercle de corrélation des variables de l'ACP et classification

On constate que deux dimensions permettent de décrire 60 % de la variabilité des points : une première dimension (38 % de la variabilité) caractérisée par les variables de fragmentation, et la seconde (21 %) par les variables de l'aléa érosif, la tendance paysagère, l'altitude et la pente. La quantité de Chrome et les variables qualitatives de Fonction, PRI\_ER et PRI\_FRAG sont particulièrement corrélées à la seconde dimension. La turbidité et la quantité de Nickel ne semblent être corrélées à aucune dimension.

Tableau 7: Résultats de la classification

GROUPE 1			GROUPE 2			GROUPE 3		
Caractéristiques	Moyenne	écart-type	Caractéristiques	Moyenne	écart-type	Caractéristiques	Moyenne	écart-type
P_EPARS	0,6	0,2	P_EPARS	0,2	0,1	P_ARBU	0,5	0,0
ER_EXT	0,6	0,2	ER_EXT	0,2	0,1	forme	2868,2	301,7
ER_FAI	0,1	0,1	ER_FAI	0,4	0,2	ptot_foret	148147,2	24391,5
P_FORET	0,1	0,1	P_FORET	0,4	0,2	nb_patch_f	192,6	31,2
P_ARBU	0,3	0,1	forme	256,4	252,0	diversite	4,0	0,4
forme	160,3	213,1	nb_patch_f	11,4	14,3	area_km2	54,0	8,2
nb_patch_f	10,3	20,4	diversite	1,2	1,0	ALT	90,5	32,1
diversite	0,9	0,9	Pente	26,5	5,3	PRI_FRAG	1,0	0,0
Pente	22,8	3,4	area_km2	3,6	4,5	Fonction	1,0	0,0
area_km2	3,4	6,9	ALT	204,3	112,6			
ALT	101,5	52,0	PRI_ER	1,9	0,9			
PRI_ER	1,0	0,0	PRI_OS	1,6	0,5			
PRI_OS	2,7	0,5	PRI_FRAG	2,6	0,6			
Fonction	1,0	0,0	Fonction	1,7	0,9			
Cr	17,4	13,1	Cr	5,4	6,1			
			Turbidite	0,7	1,6			

La classification a permis de distinguer trois groupes de bassins versants :

- Des bassins versants à tendance très dégradée, caractérisés par de fortes proportions de sols nus et d'érosion extrême, un petit nombre de patches forestiers et une surface réduite. Ils sont également associés à des valeurs de Chrome plus importantes.
- Des bassins versants à tendance dégradée à peu dégradée, caractérisés par un pourcentage plus important de forêts, une érosion majoritairement faible. De surface réduite et à forte pente, on les retrouve à plus haute altitude. Ils sont associés à des valeurs de Chrome et de turbidité moins importantes.

- Un troisième groupe est constitué de bassins versants de plus grande surface (>50 km<sup>2</sup>), particulièrement fragmentés, correspondant aux bassins versants du barrage de la Dumbéa et du trou des Nurses à Nouméa, mais des valeurs particulières de Chrome n’y sont pas associées.

La quantité de Nickel n’est pas apparue comme déterminante dans la composition des groupes.

Comme il semble plus pertinent de comparer des bassins versants de tailles homogènes, le test a été reproduit en enlevant au fur et à mesure les plus grands bassins versants isolés dans le troisième groupe. Les résultats détaillés sont présentés en Annexes 8 et 9 et résumés ci-dessous.

#### Test sur les bassins versants de moins de 50 km<sup>2</sup> :

- Les groupes 1 et 2 sont sensiblement les mêmes sauf que la turbidité n’intervient pas,
- Le groupe 3 est cette fois ci composé des bassins versants de plus de 20 km<sup>2</sup>, très fragmentés, et pour lesquels on trouve une turbidité plus importante.

#### Test sur les bassins versants de moins de 20 km<sup>2</sup> (moyenne 2 km<sup>2</sup>, écart type 1,8) :

- Groupe 1 (18 individus) composé des bassins versants de moins de 1 km<sup>2</sup> très dégradés, d’altitude et pente inférieures à la moyenne, et valeurs de Chrome plus importantes,
- Groupe 2 (5 individus) composé des bassins versants forestiers peu dégradés, sans valeur particulière de Chrome associée,
- Groupe 3 composé de bassins versants de plus de 1 km<sup>2</sup>, (21 individus) avec une végétation majoritairement arbustive (50%), à forte pente, avec des valeurs de Chrome inférieures à la moyenne.

Il aurait été intéressant de poursuivre et de réaliser une ACP sur les bassins versants inférieurs à 1 km<sup>2</sup>, très fréquents en Nouvelle Calédonie mais le nombre d’observations restantes était trop faible.

### **4.1.3 Test sur les évènements pluvieux**

Comme dit précédemment, certaines analyses ont été effectuées en période sèche. Or, l’étude des analyses alors qu’aucun épisode pluvieux n’a été enregistré la semaine précédente ne nous apprend rien sur la différence de réponse des bassins versants selon leur diagnostic. Les tests suivants ont donc été effectués sur une base de données où n’ont été conservées que les analyses faisant suite à un cumul de précipitations des 7 jours précédant, de plus de 35 mm (soit 5 mm par jour pendant 7 jours, seuil inspiré du rapport Hydromine de l’UNC et IRSTEA, considérant un épisode pluvieux à partir d’un cumul de 5 mm), soit 60 observations. Cela constitue certes une perte d’information, mais paraît plus cohérent au vu des objectifs de l’étude. Ce seuil permet de mieux intégrer la pluviosité, mais n’oublions pas que le cumul de pluie quotidien ne permet pas de distinguer s’il s’agit d’évènements pluvieux brefs et intenses ou de longs évènements de faible intensité, ce qui peut jouer sur le ruissellement...

*Tableau 8 : Effectifs utilisés pour l’analyse suite à un évènement pluvieux*

Type de substrat	Effectifs MES	Effectifs Turbidité	Effectifs Ni	Effectifs Cr
UM	41	39	42	42
VS	14	18	15	14
Total	55	57	57	56

### Comparaison des résultats

Les résultats détaillés sont présentés en Annexe 10, 11, 12, et 13, et résumés ci-dessous.

Concernant la matrice des corrélations, Chrome et Nickel ne sont pas corrélés ( $Tau = 0,18$ ) mais tous les deux corrélés à la turbidité (respectivement 0,31 et 0,32) et au cumul de pluie les 7 jours précédant l'analyse. La turbidité apparaît corrélée négativement à P\_FORET ( $tau = -0,27$ ), et le Cr est corrélé aux mêmes variables, excepté l'aire du bassin versant, la forme et la diversité.

En effet, il semblerait qu'une partie des plus gros bassins versants, très fragmentés, aient été supprimés par la mise en place du seuil de pluviosité. Ils étaient associés à des valeurs plus faibles de Chrome, ce qui peut expliquer que sans eux, le chrome n'apparaisse plus corrélé à l'aire du bassin versant ni à la forme des patches forestiers.

La comparaison de moyennes révèle moins de variables influençant les valeurs de Chrome : les variables les plus influentes, associées à des plus fortes valeurs de Chrome restent le pourcentage d'érosion extrême (à partir de 35 %), la proportion de sols nus (à partir de 40 %), l'altitude (en dessous de 100 m), la pente (en dessous de 20 °). On constate que les seuils de proportion d'érosion extrême et de sol nu ont diminués par rapport à la base de données toutes dates confondues : lors d'évènements pluvieux, des seuils inférieurs suffisent donc à déclencher des pics de Chrome.

Concernant l'ACP, en prenant en compte toutes les tailles de bassins versants, on retrouve les mêmes groupes que pour la base de données totale. Cependant, en ne conservant que des bassins versants inférieurs à 20 km<sup>2</sup>, on obtient des groupes très différents :

- Groupe 1 (7 individus) : petits bassins versants (en moyenne 0,7 km<sup>2</sup>) très dégradés caractérisés par une grande proportion de sols nus et d'érosion extrême, avec des valeurs de Chrome supérieures à la moyenne.
- Groupe 2 (11 individus) : grands bassins versants (en moyenne 4 km<sup>2</sup>), à 50% arbustifs, très fragmentés et présentant des valeurs de Nickel supérieures à la moyenne.
- Groupe 3 (9 individus) : bassins versants forestiers peu dégradés, à forte pente, présentant des valeurs de Nickel inférieures à la moyenne.

Il semblerait donc qu'en ne considérant que les analyses suite à des évènements pluvieux, le Nickel suive nos hypothèses de départ. Le Chrome et le Nickel ne semble cependant toujours pas suivre le même schéma de réponse. Les résultats du Nickel semblent même contredire nos hypothèses selon lesquelles un grand bassin versant dilue la quantité de métaux (ou alors à partir d'un certain seuil de surface et de précipitations...) et que la végétation arbustive permet de limiter les quantités de métaux. Cependant, il faudrait s'affranchir du biais de la taille des bassins versants et ne considérer que les petits bassins versants inférieurs à 1 km<sup>2</sup>. Les précipitations seraient également à intégrer de manière beaucoup plus précise.

## **4.2 BASE DE DONNEES PSSE**

### **4.2.1 Analyse statistique**

Les données relatives au risques identifiés par les communes dans les PSSE ont été analysées statistiquement puis graphiquement.

### Test d'indépendance de Khi 2

Les résultats des tests d'indépendance, appliqués sur les tableaux de contingence des variables qualitatives, présentés en détails en Annexe 14, mettent en évidence un lien entre la probabilité d'occurrence du risque de turbidité et l'aléa érosif, la tendance paysagère et la fragmentation. Ces liens ne semblent pas toujours confirmer nos hypothèses : le risque de turbidité semble plus élevé pour des bassins versants avec un aléa érosif extrême, et très fragmentés, mais aussi pour des bassins versants à tendance forestière et arbustive.

Il serait également intéressant d'étudier l'indépendance entre la probabilité d'occurrence de la turbidité et de la contamination de l'eau par les animaux sauvages présents dans le bassin versant, risque mentionné dans certains PSSE, mais cette analyse n'a pas pu être réalisée dans la présente étude.

Concernant le risque de manque d'eau, seule la tendance paysagère a montré une corrélation : la majorité des bassins versants forestiers ont un risque faible de manque d'eau (entre 0 et 2).

### Analyse en composantes principales et classification

Le test a été effectué seulement sur des bassins versants de moins de 10 km<sup>2</sup> (2 km<sup>2</sup> en moyenne, 71 observations de 26 variables). Les résultats détaillés sont présentés en Annexe 15, mais les deux variables ne semblent pas influencer la composition des groupes, ces tests ne nous apprennent rien de complémentaire. Une analyse graphique plus qualitative a donc été effectuée.

#### 4.2.1 Comparaison graphique

40 % des captages ne sont pas conformes à nos hypothèses concernant la turbidité : ils présentent soit un risque faible dans un bassin versant très dégradé, soit un risque élevé dans un bassin versant peu dégradé. Il pourrait être intéressant de vérifier, si l'influence des cerfs, et l'emplacements des patches de forêt et de sol nu pourraient expliquer ces discordances. L'exemple de captages sur la commune de Touho est présenté ci-dessous.

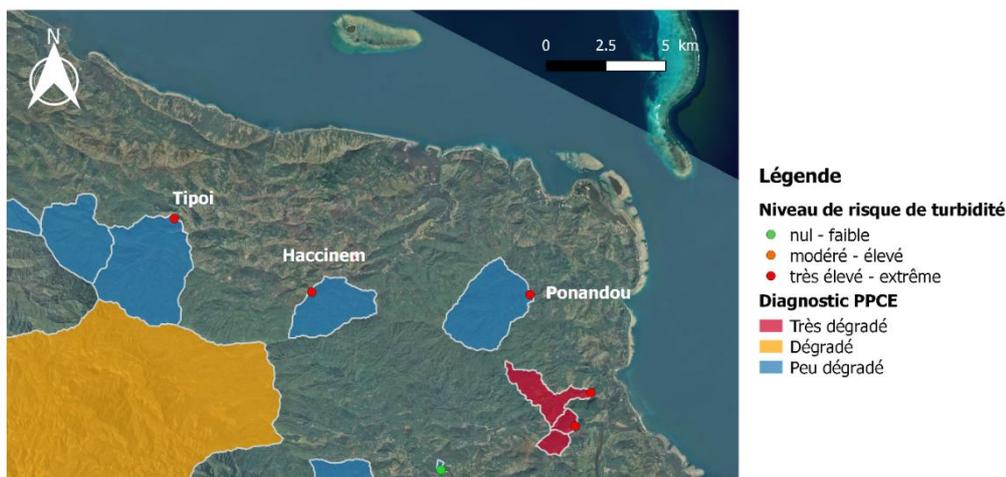


Figure 10: Comparaison du niveau de risque de turbidité et de l'état de fonctionnalité, commune de Touho



Figure 11: Comparaison du niveau de risque de turbidité avec l'occupation du sol, commune de Touhou

Le risque d'occurrence de la turbidité aux captages de Tipoi, Haccinem et Ponandou est considéré comme « très élevé », à « extrême ». Pourtant, d'après la couche d'occupation des sols, leurs bassins versant sont très majoritairement forestiers, tout autour des cours d'eau. La forte turbidité pourrait s'expliquer par la forte pression en animaux dans le bassin versant, évoquée dans le PSSE et dans le rapport RESCCUE. Cet exemple montre bien que le diagnostic ne suffit pas à expliquer la qualité de l'eau au captage si l'on ne dispose pas d'informations complémentaires.

De même pour la commune de Païta, (cartes en Annexe 15) les bassins versant des captages de Carignan, La Tamoia et Roche Blanche I sont diagnostiqués comme « très dégradés », mais ne présentent pas de risque de turbidité particulier. Selon l'occupation du sol, les cours d'eau captés semblent être bordés de forêts, et le risque de contamination de l'eau par les animaux sauvages présents dans le bassin versant est « faible », ce qui pourrait expliquer le maintien d'une bonne qualité de l'eau.

L'état du sous-bois et l'emplacement des patches forestiers semblent moins pertinent pour expliquer les discordances entre le niveau de risque de manque d'eau à l'étiage et l'état de fonctionnalité du bassin versant (67 % de non-conformité). Les communes les plus touchées dont nous avons pu consulter les PSSE sont Pouebo, Yate, le Mont-Dore, mais Poum et Ouégoa sont également connues pour connaître des étiages sévères. D'après une étude de la DAVAR (Fryso, 2008) les régimes d'étiages sont influencés principalement par la géologie (les débits étant plus importants sur substrat ultramafique) et les précipitations en période sèche. On retrouve cependant des risques élevés sur les deux types de substrat. Une forte dégradation de la végétation sur substrat ultramafique pourrait peut-être jouer un rôle également mais pas systématiquement d'après les risques évalués. Comme nous l'avons vu dans la revue de littérature, le rôle de la végétation dans le soutien aux étiages étant encore discuté, cela mériterait des études plus fines sur le territoire.

### 4.3 CONCLUSION – DISCUSSION SUR L'ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique, malgré les limites importantes évoquées précédemment, et les différences observées entre les bases de données testées, semble montrer certaines tendances : notamment une influence forte de la taille du bassin versant, révélée par les corrélations et les ACP : les très petits bassins versants sont particulièrement dégradés et associés à des valeurs de Chrome plus importantes. Il semblerait que le Chrome soit également influencé par l'occupation du sol et l'érosion (qui ne sont par ailleurs pas complètement indépendantes), et moins par la fragmentation. Les résultats de la classification sur les bassins versants de moins de 20 km<sup>2</sup> pourraient suggérer un rôle de la végétation arbustive dans la limitation des valeurs de Chrome

au captage. L'association de bassins versants forestiers, et donc de l'altitude et la pente à des valeurs plus faibles de Chrome est cependant plus aléatoire. Enfin, des fortes valeurs de Nickel sont observées en ne considérant que des analyses suivant des précipitations, pour des bassins versants de surface supérieure à la moyenne et très fragmentés.

L'analyse a également permis de déterminer des seuils de variables entraînant une augmentation du Chrome, seuils qui semblent diminuer si on ne considère que des analyses suite à des événements pluvieux. Cependant, de fortes valeurs sont également obtenues après une semaine complètement sèche, il serait alors intéressant de connaître le fond géochimique (composition chimique du sol, qui détermine la quantité de métaux naturellement présente dans les sols et donc dans l'eau), pour savoir quelles valeurs correspondent à la normale. Une perspective intéressante concernant les seuils obtenus avec la comparaison de moyenne serait la possibilité de redéfinir les seuils établis par BLUECHAM pour caractériser les différentes classes de chaque critère. En effet, les seuils actuels, définis par des études statistiques et bibliographiques, déclassent systématiquement l'état de fonctionnalité quand le service est estimé défaillant, mais une comparaison de moyennes réalisée sur des mesures plus fiables de paramètres de qualité de l'eau pourrait permettre de déterminer les seuils réellement caractérisés par une dégradation de la qualité de l'eau et donc une meilleure adéquation du diagnostic avec la réalité de terrain.

Le Chrome et le Nickel n'ayant pas donné les mêmes résultats, il faudrait étudier plus précisément les mécanismes de mobilisation de ces deux métaux dans les sols ultramafiques. Quelques recherches montrent que la disponibilité des métaux dépend de la forme ionique sous laquelle ils sont présents dans le sol, mais également de la quantité de matière organique, de colloïdes, d'oxydes de fer auxquels ils peuvent être adsorbés, du pH, de la température... S'il n'a pas été trouvé d'affirmation selon laquelle le Chrome était plus mobile que le Nickel, l'étude METEXPO (CNRT, 2017) a révélé des différences géographiques d'exposition aux différents métaux : les dépassements de valeurs de Chrome les plus importantes se retrouvent dans les communes du Nord Est (Kouaoua, Houailou, Hienghène, Touho), et ceux en Nickel plutôt à l'île des Pins, et certains captages ont été abandonnés à Thio pour cause de quantités trop importantes de Chrome VI, en aval d'un massif de péridotites exploité. Cela pourrait suggérer soit une différence des mécanismes de mobilisation des métaux selon leur forme ionique, soit une différence de leur quantité dans le sol, la détermination du fond géochimique de ces métaux étant une étude prévue prochainement par la DAVAR. Une étude plus poussée des propriétés du substrat ultramafique serait donc nécessaire, voire une considération de la pédologie plutôt que de la géologie.

L'influence de variables du diagnostic sur la turbidité n'a pas été mise en évidence. Les matières en suspension caractérisent cependant mieux la sédimentation dans le bassin versant (la turbidité étant dépendante de la nature et de la taille des particules), et seraient peut-être plus susceptibles de montrer des corrélations si elles étaient plus fréquemment mesurées.

La comparaison des risques déterminés dans les PSSE avec les résultats du diagnostic a révélé que le risque de turbidité établi par les communes était dépendant de l'aléa érosif, la tendance paysagère et la fragmentation, et le risque de manque d'eau dépendant de la tendance paysagère. Cela a aussi révélé de nombreuses discordances, qui pourraient être expliquées par l'état du sous-bois, ou la position des patches forestiers (la présence d'une ripisylve continue même dans un bassin versant dégradé pourrait peut-être suffire à limiter l'apport d'éléments terrigènes. Ce sont autant d'éléments qui n'ont pas été pris en compte dans l'étude statistique et qui pourraient expliquer l'absence de résultat pour la turbidité par exemple.

De manière globale, si l'étude statistique a montré certaines tendances qui pourraient être vérifiées, elle n'a pas permis de mettre en évidence de manière fiable une corrélation ou non de la qualité de l'eau avec l'état de fonctionnalité du PPE. Cela tient certainement à la pauvreté des données recueillies, mais ouvre des perspectives de proposition d'un protocole plus adapté, qui devra permettre un suivi en continu des paramètres de qualité de l'eau mais aussi de la pluviométrie, et prendre en compte les caractéristiques du sous-bois et la répartition des classes d'occupation du sol. La difficulté à recueillir les analyses et l'hétérogénéité des dates de relevés révèle également un manque de données à l'échelle du territoire, dû à un manque de réglementations, de financements, d'organisation et de communication entre les différentes instances de gestion de l'eau.

## 5 PROPOSITION DE PROTOCOLE

### 5.1 OBJECTIFS ET METHODES

La partie suivante de ce rapport s'attache à proposer un protocole de suivi qui permettrait d'élaborer une base de données plus adaptée pour pouvoir démontrer le rôle du couvert forestier pour limiter la pollution terrigène de l'eau potable et donc les dysfonctionnements au captage, et étudier son influence sur le débit des crues et les débits d'étiage. Cette étude permettrait d'appuyer le plaidoyer en faveur d'une préservation des forêts humides dans les bassins versants auprès des collectivités.

L'objectif serait de comparer le transport solide et les débits dans les cours d'eau captés pour l'AEP, en fonction de l'état de fonctionnalité du PPCE déterminé dans le diagnostic et certains autres paramètres qui seront développés dans ce paragraphe. Le but étant de démontrer nos hypothèses, le protocole se voudrait simple, avec un nombre réduit de paramètres étudiés, un appareillage simple, peu coûteux, et facile d'entretien. Ce protocole associe trois types de mesures : pluviométrique, hydrologique, et de la quantité de matières en suspension, ce qui permettra d'étudier la réponse des bassins versants à des événements pluvieux, de suivre les impacts au niveau du captage d'eau directement, et de comparer ces réponses entre les différents bassins versants choisis.

Selon la littérature, une méthode permettant d'étudier l'influence du couvert forestier sur les écoulements hydriques dans un bassin versant consiste à étudier des bassins versants appariés. A l'origine, le principe est de choisir deux bassins versants proches géographiquement, de même taille, ayant des caractéristiques géologiques, climatiques, et une occupation du sol similaires ; puis d'évaluer l'effet d'un traitement comme la déforestation sur le régime hydrologique des cours d'eau exutoires d'un des deux bassins versants, l'autre servant de témoin. Ces études ont permis de caractériser plutôt des variables d'écoulements hydriques, débits annuels, débits critique d'étiage, mais on pourrait s'inspirer de cette méthode pour étudier la quantité de matières en suspension ou de turbidité.

L'établissement de ce protocole s'est basé sur les méthodes recensées dans la littérature, ainsi que sur deux études réalisées en Nouvelle Calédonie : le projet Hydromine réalisé entre 2009 et 2012 par l'Université de Nouvelle Calédonie et l'IRSTEA (UNC et IRSTEA, 2014) visant à quantifier les flux solides et liquides dans les bassins versants miniers, ainsi que le projet de mise en place d'un dispositif de suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion sur le bassin versant de le Thiem dans le cadre du projet RESCCUE (RESCCUE, 2015).

### 5.2 PARAMETRES A SUIVRE

#### 5.2.1 Suivi du régime hydraulique

Une mesure en continu du débit du cours d'eau est nécessaire pour suivre les conséquences des événements pluvieux entraînant des crues, ou les régimes d'étiage. Généralement, un seuil de section particulière est construit (exemple en Figure 17), comprenant un capteur de pression permettant d'établir une relation hauteur d'eau/débit univoque ou courbe de tarage (à une hauteur d'eau donnée correspond toujours le même débit). Des jaugeages au pas de temps mensuel permettent ensuite d'ajuster la courbe de tarage (UNC, IRSTEA, 2014).

Ce dispositif étant cependant coûteux à l'installation et induisant une modification du milieu, ainsi qu'un potentiel abandon une fois l'étude terminée, il serait souhaitable d'établir la relation hauteur/débit du creek de

manière plus traditionnelle : avec une échelle limnimétrique sur une section déterminée (évaluée en relevant la profondeur d'eau en diverses verticales réparties régulièrement sur toute la largeur), à fond rocheux de préférence pour limiter les modifications de section lors des crues par exemple, associée à des jaugeages réguliers avec un moulinet permettant d'échantillonner le profil de vitesse du cours d'eau, à des hauteurs d'eau différentes (communication personnelle, Pierre Genthon, IRD). Cette station de mesures pourrait être installée juste en amont de la retenue du captage pour que les résultats soient représentatifs de la situation au captage. Cette méthode est cependant source de plus d'incertitudes.



Figure 12 : Seuil utilisé pour le protocole Hydromine

### 5.2.2 Suivi de la concentration en matières en suspension

L'objectif étant de relier l'état du couvert forestier à la qualité de l'eau potable, c'est la méthode de suivi de la concentration des MES via le suivi de la turbidité qui paraît la plus adaptée.

Une sonde de turbidité enregistreuse peut être installée, associée soit à un échantillonneur automatique (prélèvement des échantillons de manière télégérée, puis un opérateur vient récupérer l'échantillon pour réaliser les analyses), dispositif très coûteux, soit à des relevés manuels et une détermination en laboratoire des MES (simple séchage et pesée). Le but de ce genre d'échantillonnage est de quantifier les MES et la turbidité en parallèle dans un premier temps pour établir une relation entre les deux paramètres sur l'ensemble de la gamme de concentration des MES, faibles et élevées (Mano, 2008), et finalement n'utiliser que la sonde de turbidité pour estimer les MES, qui constituent un meilleur indicateur de la quantité de matériaux déposés dans le cours d'eau suite aux précipitations. Le placement de la sonde et la récolte des échantillons pourrait se faire directement au niveau du captage.

Selon le budget disponible, des analyses de qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau, ainsi qu'un suivi des métaux pourraient également être effectuées au niveau du captage, à une fréquence mensuelle et suite à d'importants événements pluvieux (seuil de précipitations à déterminer).

### 5.2.3 Suivi de la pluviométrie

Il est nécessaire d'installer un pluviomètre au plus près de la station de mesure, sur une surface non arborée pour pouvoir mettre en relation les augmentations de turbidité avec les épisodes pluvieux. Les pluviomètres à augets basculeurs avec une centrale d'acquisition sont couramment utilisés sur le territoire par la DAVAR et MétéoFrance. Ces instruments sont très simples d'installation et d'entretien. De même que pour la turbidité, les données peuvent être télétransmises ou récoltées sur place.

## 5.2.4 Suivi des captages

On pourrait également envisager un suivi du fonctionnement du captage de manière plus précise, par la tenue d'un carnet d'observations par les fontainiers de la commune (recommandé par la DASS dans les PSSE), regroupant les actions suivantes :

- Réaliser un examen visuel toutes les semaines et après chaque pluie,
- Répertoire toutes les opérations d'entretien,
- Répertoire les dépassements des seuils de turbidité (2 NFU) et les adaptations de traitement ou les coupures d'adduction engendrées, ainsi que le temps de coupure,
- Répertoire les épisodes de manque d'eau au captage.

Cela permettrait d'évaluer les coûts supplémentaires de gestion de l'eau ou les coûts compensatoires en cas de forte turbidité ou de sécheresse, et de quantifier leur fréquence dans l'année, en fonction de l'état du bassin versant.

## 5.2.5 Interprétation des résultats

Le suivi de des 3 paramètres quantitatifs va permettre de catégoriser les événements pluvieux (durée, cumul des précipitations, intensité moyenne) et d'analyser les débits en réponse à ces événements (débit moyen, lame d'eau ruisselée) ainsi que les quantités de MES/turbidité associées.

Des graphiques de lame d'eau ruisselée en fonction des précipitations, relations pluie/débit, et débit/turbidité pourront ainsi être établis et comparés selon le diagnostic du bassin versant (comparaison des seuils de déclenchement du ruissellement, de l'intensité et la fréquence des pics de turbidité etc...).

## 5.3 COÛTS DES INVESTISSEMENTS ET DU FONCTIONNEMENT

### 5.3.1 Matériel

Le tableau suivant récapitule le matériel nécessaire au suivi ainsi que le coût de mise en place.

Tableau 9: Coût du dispositif

Instruments de mesure	Variable mesurée	Prix (kXPF) (Source : RESCCUE, 2015)
Pluviomètre automatique à augets basculants Avec enregistrement des données (data logger) A monter sur un pied support	Hauteur de pluie	400
Pluviomètre totalisateur A monter sur pied support	Cumul des pluies (contrôle des mesures du pluviomètre automatique)	100
Capteur radar Avec alimentation solaire et potence	Hauteur d'eau	650
Echelle limnimétrique	Hauteur d'eau (contrôle des mesures des capteurs)	100
Moulinet hydrométrique Monté sur perches coulissantes	Profil de vitesse du cours d'eau	indéterminé
Turbidimètre	Turbidité	250
	Total	1500

L'appareillage de base sur un point de mesure revient à 1.5 millions de francs CFP (environ 125 00 euros), certains appareils pourraient cependant être prêtés par des organismes. La construction d'un seuil permettant d'établir la relation hauteur d'eau/débit rajouterait jusqu'à 3.3 millions de CFP (RESCCUE, 2015), et une

analyse physico-chimique et bactériologique de base revient à moins de 10 000 francs, soit 120 000 francs à l'année pour une analyse mensuelle, à quoi il faudra ajouter les analyses suite à des événements pluvieux.

### 5.3.2 Main d'œuvre

L'étude nécessiterait un gros travail de suivi pour l'établissement de la courbe de tarage (au moins 5 demi-journées, communication personnelle, IRD), le calibrage des appareils, le contrôle de leur bon fonctionnement, leur entretien (minimum 2 fois par mois et suite à des fortes pluies), et le relevé au moins mensuel des mesures enregistrées, la détermination des MES en laboratoire, l'établissement du lien avec la turbidité, l'analyse des résultats... Les vérifications de terrains pourraient être effectuées par les fontainiers, et la récolte et l'analyse des données enregistrées par un bureau d'étude ou un étudiant en thèse.

## 5.4 CHOIX DES BASSINS VERSANTS A EXPERIMENTER

### 5.4.1 Bassin versants jumeaux ou suivi temporel d'un seul bassin versant

Le principe serait de choisir un couple de bassins en amont de captages AEP, proches géographiquement et ayant les mêmes caractéristiques de : taille, pente, altitude, substrat géologique principal, précipitations moyennes sur l'année, composé d'un bassin dont la fonctionnalité serait qualifiée de « très dégradée » au regard du diagnostic PPCE, et l'autre de « peu dégradée », sans se limiter à la fonctionnalité finale mais en prenant en compte les variables quantitatives permettant d'établir le diagnostic.

Une détermination sur le terrain de l'état du sous-bois ainsi que de l'emplacement des zones fortement érodées serait également nécessaire, comme soulevé dans l'analyse statistique.

On pourrait imaginer une expérimentation sur plusieurs groupes de bassins versants :

- Un trio de bassins versants : à dominante forestière avec sous-bois non dégradé, arbustif et sol nu
- Un couple considéré comme « peu dégradé » dont un des bassins versants aurait un sous-bois dégradé par le passage des EEE

De nombreuses variantes seraient imaginables selon les paramètres de la forêt étudiés (proportion de forêt, fragmentation etc...), ou la prise en compte du type de substrat ou de sol. La limite qui se pose serait cependant de trouver des couples de bassins versants qui seraient effectivement comparables. De plus, les dispositifs expérimentaux sont à multiplier par 2, et donc les financements nécessaires.

Une autre solution qu'on pourrait privilégier serait de suivre un seul bassin versant avant et après une dégradation (ce qui reste difficile à anticiper) ou au contraire de suivre un bassin versant avant et après sa restauration, voire plusieurs, pour tester différents types de restauration (plantations en plein, fascines dans les ravines, effort de chasse...). Cela pourrait permettre de déterminer quels processus suffisent à réduire la turbidité par exemple. Le choix d'une de ces options dépendrait du budget alloué à l'expérimentation.

### 5.4.2 Articulation possible avec des projets déjà existants

La valorisation de projets existants permettrait de partir avec un pool de données préexistant et/ou une bonne connaissance des événements passés sur un secteur donné, ainsi que parfois des équipements déjà mis en place qui ne nécessitent qu'un entretien courant. Ainsi le coût des suivis sera nettement amoindri par rapport un nouveau projet *ex-nihilo*.

Dans le cadre du projet RESCCUE mentionné précédemment par exemple, une expérimentation permettant un suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion est en cours sur le bassin versant de la Thiem sur la commune de Touho. Le but est d'étudier l'impact des feux et des espèces envahissantes sur la réponse hydrologique et érosive de 3 placettes de 100 m<sup>2</sup> : une constituée de savane à niaoulis, une placette forestière avec une litière en bon état, et une avec un sol très dégradé par le passage répété des EEE. Le dispositif est en place depuis juin 2017, et suivi par une étudiante en thèse depuis mai 2018.

Même si les résultats obtenus sur les placettes ne seront pas extrapolables aux phénomènes en jeu dans un bassin versant, le but poursuivi par l'étude est sensiblement identique au notre. Cela pourrait être une opportunité pour le WWF d'enrichir ce projet pilote : un turbidimètre automatique pourrait être mis en place directement au niveau du captage d'Haccinem, associé à des analyses chimiques régulières (1 fois par mois et suite à des événements pluvieux), et le suivi hydrologique pourrait s'effectuer sur la section stable de rivière en amont du captage, sans seuil. De plus, les associations de chasse et de replantation des tribus de Poyes et Tiwae de Touho participent déjà à la restauration du bassin versant du captage, on pourrait alors suivre l'impact de ces actions (et financer des actions plus importantes) sur la qualité de l'eau, sur les régimes de crues et d'étiage.



Commune	Hienghene	
Captage	Tanghene 1	Tanghene 2
ID_unique	46	47
AREA	1,7	2,52
Fonction	2	1
PRI_ER	2	1
PRI_OS	1	2
PRI_FRAG	3	3
sols_um	0	0
sols_vs	1	1



Commune	Poya	
Captage	Ouendji	Nerin
ID_unique	142	147
AREA	10,9	10
Fonction	1	3
PRI_ER	1	3
PRI_OS	2	1
PRI_FRAG	3	3
sols_um	0,9	0,85
sols_vs	0,1	0,15

Figure 13 : Exemple de couples de bassins versants possibles pour l'expérimentation

## **6 REFLEXION SUR LA MISE EN PLACE D'UN OBSERVATOIRE DE LA QUALITE DE L'EAU EN NOUVELLE CALEDONIE**

Un gros manque de données de suivi de la qualité de l'eau a été mis en évidence à l'échelle de la Calédonie. Une mise au point sur le suivi actuel va donc être présentée, ainsi qu'une réflexion sur la possibilité de mettre en place un réseau de suivi, sujet d'actualité dans le cadre de l'élaboration de la nouvelle politique de l'eau de Nouvelle-Calédonie courant 2018.

### **6.1 OBSERVATOIRE ACTUEL DE LA RESSOURCE EN EAU AEP**

La DASS et la DAVAR présentés précédemment, sont les deux organismes jouant un rôle majeur dans le suivi de la ressource en eau en Nouvelle-Calédonie.

La DASS a un rôle de conseil et de soutien auprès des communes pour les aider à distribuer une eau de boisson de qualité, sans risques pour la santé de la population et les assiste dans la rédaction des PSSE.

Le service de l'eau de la DAVAR, suit un réseau de 87 points de prélèvements répartis sur les cours d'eau de dix bassins versants de la Grande-Terre et sur les Îles Loyauté (choisis en fonction des enjeux agricoles et urbains pour localiser certaines pollutions, mais ne concerne pas forcément les réseaux AEP), et effectue des analyses deux fois par an, en saison chaude et en saison fraîche. Un suivi est également effectué sur les pesticides en aval des zones agricoles. Ces données d'analyses physico-chimiques, bactériologiques et résidus de pesticides sont bancarisées dans la base de données ATYA, propriété de la DAVAR. Un réseau de suivi des nappes souterraines est fonctionnel depuis 3 ans (20 piézomètres). Un réseau de limnimètres (40 stations), et pluviomètres (70 stations) est également suivi en continu.

### **6.2 LA NECESSITE DE METTRE EN PLACE LE RESEAU**

La plupart des communes font seulement une analyse à la ressource par an, voire aucune. D'après les entretiens réalisés auprès de la DASS et la DAVAR notamment, ce manque de données s'explique entre autres par un manque de réglementation (les communes ne sont pas tenues de suivre les recommandations de la DASS en terme de fréquence d'analyses, ni de les rendre publiques), ainsi qu'un manque de moyens financiers : si le coût d'une analyse physico-chimique et bactériologique de base coûte moins de 10 000 FCFP, elle peut monter jusqu'à 300 000 FCFP pour une analyse complète comprenant des paramètres toxiques, voire plus pour les pesticides. Certaines communes privilégient l'investissement pour l'accès à l'eau de tous les habitants, avant de s'occuper des problèmes de qualité...

Une analyse uniquement en sortie de réseau après traitement est nécessaire, mais ne suffit pas à surveiller l'état de la ressource, car on ne pourra pas déterminer si la contamination vient directement de la ressource, du réservoir ou du passage dans les canalisations. L'intérêt du suivi de la qualité de l'eau brute au niveau du captage est notamment de pouvoir détecter des risques de contaminations, les menaces sur la qualité de l'eau dans le bassin versant, notamment les problèmes de trop forte turbidité, de contamination bactériologique par la présence des cerfs, ou chimiques par l'éventuelle diffusion d'effluents agricoles, et de proposer des moyens de correction adaptés. L'identification des menaces pesant sur l'eau brute permettrait aux communes de déterminer les actions à mettre en place en amont du captage pour y remédier, et économiser certains coûts dont ceux déterminés dans la partie sur le chiffrage du service écosystémique rendu par la forêt pour la ressource en eau. Un suivi en continu permet aussi de suspendre l'adduction en eau en cas de dépassement des normes de potabilité, et éviter de propager une contamination jusqu'à la station de traitement, quand elle existe (un tiers des communes ne traitant pas l'eau avant la distribution).

### **6.2.1 Objectifs de la réflexion**

L'objectif de la réflexion est d'aboutir à la mise en place d'un réseau de suivi de la qualité de l'eau sur toute la Nouvelle Calédonie, l'Ile des pins et les Iles loyauté, à une meilleure connaissance des menaces de la ressource AEP brute des captages superficiels en qualité et quantité via un suivi régulier, et à la création d'une base de données mutualisée et publique.

Pour cela nous devons déterminer les points suivants :

- Les paramètres à suivre et leur fréquence,
- Les coûts potentiels d'un tel suivi et les financements possibles,
- Le choix des captages à suivre,
- Les acteurs qui interviendraient dans la mise en place des suivis, la mutualisation et la gestion de la base de données commune,
- Les réglementations nécessaires à la mise en place de cet observatoire.

Pour répondre à ces questions, des entretiens ont été effectués avec les gestionnaires de la ressource en eau en Nouvelle Calédonie : la DASS et la DAVAR notamment.

## **6.3 PARAMETRES A SUIVRE ET FREQUENCE**

### **6.3.1 Paramètres de qualité de l'eau**

Le tableau ci-dessous permet de comparer les paramètres et fréquences d'analyses préconisés par la DAVAR et par le code de la santé publique appliqué en France métropolitaine.

Tableau 10 : Recommandations des paramètres analysés et fréquence des analyses à la ressource

Recommandations	Type de mesure	Ressource	Paramètres mesurés	Fréquence
DAVAR	Mesure <i>in situ</i>	Toutes les UD	Turbidité, Température, pH, Conductivité O2 dissous	Annuelle
	Bactériologie	Toutes les UD	Coliformes totaux, Entérocoques, E.Coli Bactéries sulfito-réductrices	
	Physico-chimique	Variable	Variable selon les analyses : couleur, titre hydrométrique, titre alcalimétrique, métaux...	
Code de la santé publique métropolitain	Paramètres bactériologiques	Toutes les UD	Bactéries colliformes, salmonelles Entérocoques intestinaux, E.Coli, bactéries colliformes	Annuelle
	Paramètres chimiques et organoleptiques	Toutes les UD	Aspect, couleur, odeur, pH, Température, conductivité, DBO5, DCO, MES, turbidité Eléments chimiques (Al, As, Cd etc...) Métaux (Cr, Mn, Cu, Fe etc...) Nitrates, phosphates, azote totale	2 fois par an (débit entre 100 et 1999 m <sup>3</sup> /j)
	Paramètres chimiques et organoleptiques	Toutes les UD	Nickel, Plomb, pesticides, benzène, cadmium, chloroalcanes, hydrocarbures polycycliques, mercure	4 fois par an (débit entre 100 et 1999 m <sup>3</sup> /j)

La DAVAR préconise l'analyse de paramètres communs à toutes les UD, de manière annuelle, ainsi que des paramètres spécifiques à certaines UD, en fonction des menaces déterminées par 3 séries d'analyses préalables à la rédaction du PSSE.

Les normes métropolitaines préconisent quant à elles, une fréquence d'analyse à la ressource dépendante du débit journalier, majoritairement dans la tranche de 100 à 1999 m<sup>3</sup>/j pour les captages superficiels en Nouvelle-Calédonie (DAVAR, 2018). Les recommandations d'analyses de l'eau distribuée (après traitement), est ensuite fonction du nombre d'habitants desservis.

Comme dit précédemment, les communes disposant de peu de moyens financiers et humains pour assurer les analyses à la ressource, le but est de choisir un nombre de paramètres réduit mais pertinents, et une fréquence minimale d'analyses, supportable financièrement.

Nous pourrions conserver par exemple une base de deux analyses par an, une en période sèche, et une en période humide, et, les captages superficiels étant particulièrement sujets à des problèmes de turbidité, on pourrait préconiser une analyse supplémentaire suite aux événements pluvieux. Un seuil de précipitations entraînant un ruissellement pourrait être défini avec l'aide de MétéoFrance ou de la DAVAR. De même, après une forte perturbation dans le bassin versant (incendie par exemple), un suivi plus régulier serait nécessaire, une fois par mois à minima pendant 3 à 6 mois, le temps de rétablissement de la végétation.

Concernant les paramètres à suivre, au vu des objectifs il paraît plus cohérent d'appliquer les recommandations de la DAVAR et de sélectionner les paramètres propres à chaque captage en fonction des analyses préalables plutôt que tous les paramètres du Code de la santé publique.

Tableau 11: Proposition de paramètres à suivre et fréquence

Type de mesure	Paramètres	Importance de la mesure	Ressource	Fréquence
Paramètres physico-chimiques (possible in situ)	Turbidité	Présente un risque sanitaire et physique (obstruction de la crépine)	Toutes les UD	3 fois par an : période sèche période humide après les pluies
	pH	Influence les procédés de traitements dont l'efficacité de la désinfection par le		
	Température	Inversement corrélée au pH, agit sur la coagulation des MES		
	Conductivité	Indicateur de la concentration en solutés ionisables (nitrates, phosphates...)		
Paramètres bactériologiques (laboratoire)	Dioxygène dissous	Indicateur des phénomènes de dégradation de la matière organique	UD	A déterminer selon le risque
	Colliformes totaux	Risque sanitaire, bactéries d'origine fécale, peut être indicateur de la présence		
	Entérocoques	d'animaux dans le bassin versant, ou de baigneurs au captage		
	E.Coli			
Paramètres chimiques indésirables/toxiques (liste non exhaustive)	Bactérie sulfite-réductrice		à risques	A déterminer selon le risque
	Nitrates, phosphates et pesticides	Indicateurs d'une pollution aux effluents agricoles, risque d'eutrophisation des eaux superficielles		
	Métaux lourds (Cr, Ni)	Toxicité possible si consommation chronique ou en fortes quantités		
	Benzène, HAP	Cancérogènes, Indicateurs d'une pollution d'origine industrielle		

Le tableau ci-dessous récapitule une proposition des paramètres à suivre et leur fréquence.

### 6.3.2 Paramètres de fonctionnement du captage

Comme mentionné dans la proposition de protocole, un examen visuel hebdomadaire et après chaque épisode pluvieux est nécessaire (ce qui permet, pour les communes non équipées d'un turbidimètre automatique, de couper l'adduction en cas d'eau trop chargée par exemple, ou d'adapter les traitements), ainsi que le recensement de toutes les opérations d'entretien effectuées, les dépassements des seuils des paramètres analysés, leur date, les adaptations de traitement ou de coupure d'eau engendrés et le temps de coupure, ainsi que des épisodes de manque d'eau a captage, devrait être effectué dans un carnet d'observations tenu par les fontainiers.

## 6.4 PRIORISATION DES CAPTAGES A SUIVRE

L'idéal serait de suivre tous les captages, mais une priorisation pourrait être nécessaire en cas de manque de financements et/ou de moyens humains. On pourrait imaginer une priorisation des captages à suivre selon plusieurs critères :

- L'état du bassin versant : diagnostic PPCE (notamment érosion et tendance paysagère), état du sous-bois, emplacement des zones les plus érodées...
- La fréquence et l'importance des dysfonctionnements observés (PSSE),
- L'accessibilité de l'ouvrage,
- Le nombre de personnes desservies.

## 6.5 COUT DU DISPOSITIF ET FINANCEMENTS DISPONIBLES

Pour les principaux paramètres *in situ* et bactériologiques cités dans le tableau il faut compter moins de 10 000 FCFP par analyse (communication personnelle, DAVAR). Cela reviendrait donc à 30 000 FCFP (soit 250 euros) par captage et par an, auxquels il faudra ajouter le prix des analyses des paramètres physico-chimiques ciblés par les analyses préalables, ce qui est potentiellement le plus coûteux. La turbidité, le pH, la conductivité, l'O<sub>2</sub> dissous et la température pourraient même être mesurés *in situ* grâce à une sonde multi-paramètres (Hanna Instruments, 2000 euros).

La mise en place d'un turbidimètre automatique est évaluée à environ 150 000 FCFP (1200 euros, PSSE Pouebo), sans les coûts de fonctionnement annuels.

Enfin, il serait nécessaire pour certains captages de sécuriser l'accès en temps de pluie, car le manque d'entretien ou d'analyse car le captage n'est pas accessible ou dangereux est fréquent dans les PSSE.

La mise en place de la tarification de l'eau dans toutes les communes, ce qui n'est pas encore le cas actuellement et qui constitue un des objectifs de la nouvelle politique, pourrait permettre de couvrir une partie de ces coûts. N'oublions pas cependant qu'une meilleure connaissance de la ressource permet d'identifier les menaces et d'y remédier, et d'éviter ainsi des surcoûts de gestion abordés qui seront abordés dans la partie suivante. La mise en place de la nouvelle politique de l'eau s'accompagnera certainement d'une mise à disposition de moyens financiers dédiés, répartis entre les principaux objectifs de la nouvelle politique. La DAVAR, en tant que pilote de cette nouvelle politique, est chargée de proposer les grands axes stratégiques, et de les décliner en plan d'action. Il est cependant impossible actuellement de savoir quels seront les stratégies prioritaires retenues par le gouvernement et quel budget y sera alloué, ce qui déterminera qui supportera les coûts de ce suivi.

## **6.6 MISE EN PLACE DU SUIVI, GESTION ET MUTUALISATION DES DONNEES**

Les prélèvements nécessaires au suivi et la gestion du turbidimètre sont déjà effectués par les fontainiers ou les gestionnaires du captage pour la plupart des communes. Le laboratoire d'analyse pourrait alors transmettre directement les résultats à la commune et à la DAVAR, qui se chargerait de mutualiser les résultats, et mettre à jour une base de données publique en ligne de manière annuelle.

## **6.7 REGLEMENTATIONS NECESSAIRES**

Une réglementation obligeant les communes à suivre les recommandations pourrait être instaurée, seulement si les moyens financiers le permettant sont débloqués. Des contrôles du suivi pourraient également être effectués par la DASS de manière annuelle.

La régularisation de 100 % des périmètres de protection des captages serait également nécessaire.

Les facteurs de réussite de la mise en place de cet observatoire seraient l'obtention de financements suffisants, une priorisation de la connaissance et la protection de la ressource par la nouvelle politique, et une prise de conscience et volonté des communes de protéger leur ressource. On pourrait imaginer la mise en place dans chaque commune d'un comité de gestion de l'eau, comme c'est déjà le cas dans certaines (La Foa, VKP...), constitué des élus, des fontainiers, des différents utilisateurs et de coutumiers qui établirait et suivrait un schéma de gestion des eaux à l'échelle de la commune et un diagnostic et une orientation de gestion pour chaque bassin versant. Ce comité pourrait être accompagné dans un premier temps par des agents de la DASS et de la DAVAR.

## 7 ELEMENTS DE CHIFFRAGE DU SERVICE ECOSYSTEMIQUE RENDU PAR LA FORET POUR LA RESSOURCE EN EAU POTABLE

### 7.1 EVALUATION ECONOMIQUE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES

L'environnement joue un rôle économique essentiel en fournissant de nombreux services à la société. Seulement, la plupart de ces services n'ont pas de valeur marchande et ne sont donc pas pris en compte dans les orientations des politiques publiques. Suite au Millenium Ecosystem Assessment, présenté précédemment, et à la prise de conscience de l'importance de ces services pour la société, des méthodes ont été développées pour estimer la valeur économique de notre capital naturel, et le prendre en compte de manière plus éclairée lors des décisions de gestion du territoire (MEA, 2005).

#### 7.1.1 Valeur des services écosystémiques

On distingue plusieurs sortes de valeurs d'un service, détaillés dans la Figure 26 qui doivent être additionnées pour obtenir une valeur totale.

*Tableau 12: Valeurs des services écosystémiques, source : INRA, SIA 2014*

Type de valeur	Définition	Exemple
Valeur d'usage direct	Liée à un usage effectif reposant sur l'interaction de l'agent avec l'actif	Ressource (bois), usage récréatif
Valeur d'usage indirect	Liée à un usage effectif n'impliquant pas d'interaction avec l'actif	services de régulation
Valeur d'option	Reflète l'intérêt de préserver les actifs pour des usages futurs potentiels	réserve de bois
Valeur de non-usage	Relative à des actifs qui ne seront jamais utilisés (valeur d'existence, de leg)	services culturels, religieux

L'évaluation du service rendu par la forêt pour la ressource en eau revient à déterminer la valeur d'usage indirect de la forêt (service écosystémique de régulation plutôt que d'approvisionnement).

#### 7.1.2 Méthodes d'évaluation des services écosystémiques

Il existe plusieurs méthodes permettant d'approcher la valeur économique d'un service écosystémique, parmi les plus utilisées :

- La méthode basée sur les prix du marché : s'applique a un service qui fait l'objet d'une échange marchand, concerne donc essentiellement les biens d'approvisionnement,
- La méthode basée sur les coûts : estime la valeur à travers le paiement des alternatives au services rendus. Comme l'approche par les coûts d'évitement des dégradations dues à la perte du service, ou les coûts de remplacement du service par des méthodes artificielles,
- La méthode basée sur les préférences révélées des consommateurs : coûts de transport engagés pour se rendre sur un site naturel, prix hédonistes basés sur les transactions marchandes de biens différenciés, immobiliers par exemple, pour estimer les bénéfices ou les coûts associés à la qualité environnementale,
- La méthode du transfert de valeur : utilisation de données obtenues dans les cadre d'autres études et adaptation au contexte local, lorsque la donnée n'est pas disponible sur place.

Dans le cas de services d'usage indirect, comme les services de régulation fournis par les forêts, les méthodes basées sur les coûts et de transfert de valeur sont les plus utilisées.

Les chiffres obtenus lors de l'évaluation peuvent varier selon les méthodes, les contextes, et ne constituent pas une fin en soi mais permettent d'avoir une vision pluridimensionnelle des enjeux, afin de les intégrer dans les

processus de décision de la gestion et l'aménagement du territoire et dans les argumentaires en faveur de la protection des milieux naturels (Dupras *et al.*, 2013).

Comme établi dans la bibliographie, la forêt joue plusieurs rôles mais seuls ceux relatifs à la qualité/disponibilité en eau potable ont été analysés ici : le service de stabilisation des sols, de soutien aux étiages, et de maintien d'une bonne qualité de l'eau. La méthode utilisée sera précisée pour chaque type de service. Lorsque cela était possible, les données ont été obtenues auprès des acteurs de l'eau et des services techniques des communes et de la province Sud, et dans les PSSE les plus récents des communes.

## **7.2 SERVICE DE REGULATION DE LA QUALITE DE L'EAU PAR STABILISATION DES SOLS**

Comme indiqué dans la littérature, la perte du service écosystémique de stabilisation des sols par le couvert forestier entraîne une augmentation de l'apport de sédiments en aval, jusque dans les cours d'eau dont une partie est captée pour l'adduction en eau potable. On peut noter que sur les 88 captages (captages superficiels, sources, TD) répertoriés dans les PSSE de 10 communes entre 2015 et 2017, 68 présentent d'après l'appréciation des communes, des risques de turbidité après de fortes précipitations (soit presque 80 %, dont plus de la moitié avec un risque élevé à extrême).

Une méthode possible d'évaluation de ce service, retenue ici, consiste à évaluer les coûts découlant de la dégradation de ce service (EFESE, 2017), et les coûts du remplacement hypothétique du service par des méthodes artificielles. On distingue 4 types de surcoûts entraînés par la gestion d'une eau trop turbide.

### **7.2.1 Surcoûts de traitement de l'eau**

Deux cas de figures peuvent être distingués ici : pour les communes équipées de stations de traitement de l'eau, une eau trop turbide entraîne une augmentation des coûts de traitements, comme c'est le cas pour l'usine de traitement du Mont-Té de Nouméa. Pour les communes non équipées (la majorité), la construction de stations de floculation-décantation-filtration-désinfection peut parfois être nécessaire.

#### **7.2.1.1 Coûts réels de la dégradation du service**

Des pics de turbidité plus fréquents et plus élevés sont constatés depuis l'incendie de la Montagne des Sources, en amont du barrage de la Dumbéa en 2005 (PSSE Dumbéa, 2014). La station de traitement du Mont-Té à Nouméa, permet de potabiliser l'eau arrivant du barrage de la Dumbéa, soit 86 % des apports d'eau pour Nouméa (Ville de Nouméa, 2016). L'eau est automatiquement décantée, filtrée et désinfectée à la javel, obtenue par des sels d'électro-chloration. Quand la turbidité dépasse 2 NFU, un traitement au sulfate d'aluminium, permet la coagulation des matières en suspension avant la décantation. En 2017, ce traitement a été nécessaire 47 jours de l'année soit 13 % du temps. Au total, 31 tonnes de sulfate d'aluminium ont été nécessaires, à un coût de 100 F CFP/kg (CDE 2017). En plus de cela, les matières en suspension diminuant l'efficacité du traitement de désinfection, une augmentation des dosages de sels d'électro-chloration est nécessaire, dont le surcoût n'a pas pu être déterminé. Pour la ville de Nouméa, plus de 3 100 000 F CPF (soit 26 000 euros) ont donc été dépensés en matière première de traitements pour gérer l'eau trop turbide arrivant du barrage suite à des épisodes pluvieux importants.

### **7.2.1.2 Coûts de remplacement du service**

On peut estimer ce que coûterait la construction de stations de traitement (floculation, décantation, filtration, désinfection) pour toutes les unités de distribution (regroupant plusieurs captages) qui n'en sont pas encore équipées. Pour cela, on peut prendre pour référence un coût d'investissement de 12 millions de F CFP pour une station de traitement pour une moyenne de 100 habitants (0 à 250 habitants), 32 millions de F CFP pour 500 habitants (250 à 750 habitants, RESCCUE, 2016), et 50 millions pour 1000 habitants (750 à 1250 habitants, extrapolation). Les unités de distribution de chaque commune n'ayant pas encore de station de traitement ont été recensées, ainsi que le nombre de personnes desservies, quand les données étaient disponibles dans les PSSE. Concernant les communes pour lesquelles ces informations n'étaient pas précisées (20 communes), le coût d'une station de traitement de capacité de la population de la commune a été estimé, ce qui conduit à une probable surestimation car les forages ne sont pas pris en compte et ne nécessitent pas de décantation. Le tableau comprenant les détails du calcul pour chaque commune est présenté en Annexe 16. Ainsi, le coût de remplacement du service de stabilisation des sols rendu par les forêts représenterait un investissement de 4,3 Milliards de F CFP à l'échelle de la Grande Terre (soit environ 36 millions d'euros), ainsi que 260 millions de F CFP de fonctionnement annuel (2,2 millions d'euros) en prenant 2 millions de francs de fonctionnement pour une station pour 500 personnes (PSSE Pouebo 2017).

## **7.2.2 Surcoûts d'entretien des captages**

### **7.2.2.1 Coûts réels de la dégradation du service**

A la suite de fortes précipitations, les captages superficiels peuvent être impactés par l'apport d'éléments terrigènes qui colmatent la grille et la crépine, ce qui nécessite une augmentation de la fréquence de nettoyage du captage, ainsi que parfois, une purge des réservoirs et du réseau, voire un curage de la retenue. D'après les informations récoltées auprès des mairies, les nettoyages des captages vont de 1 fois par semaine (Farino, Mont-Dore), à 2 fois par an (Touho), cependant le nettoyage peut également être dû à un surplus de feuilles d'arbres venant obstruer les grilles, on ne peut donc pas faire la différence entre un entretien dû à la turbidité ou à d'autres causes à partir de ces informations. La CDE a été contactée à ce sujet mais n'a pas pu déterminer ces éléments. Cette augmentation de la fréquence de l'entretien des captages lors des épisodes de forte turbidité est cependant avérée, ainsi que du nettoyage des filtres de la station du Mont-Té (communication personnelle, CDE).

D'après une estimation de la DAVAR, le curage d'une retenue ou d'un cours d'eau revient à 3000 F CPF par mètre cube prélevé, mais cela dépend également des moyens utilisés et du devenir des matériaux extraits (mis en dépôt, épandus sur les berges ou des parcelles agricoles, utilisés pour des remblais, aménagements paysagers...). Si l'on applique cette estimation pour le barrage de la Dumbéa, dont la retenue a perdu 320 000 m<sup>3</sup> par rapport à sa capacité initiale (schéma présenté précédemment en Figure 6), un curage représenterait un minimum de 960 millions de F CFP (plus de 8 millions d'euros) sans compter le déplacement des matériaux extraits. La chute du volume utile de 86 000 m<sup>3</sup> après l'incendie de la Montagne des Sources en 2005, représenterait ainsi 258 millions de F CFP (2 millions d'euros), ce qui donne une estimation d'une partie des dégâts causés par cet incendie.

### 7.2.3 Surcoûts d'utilisation d'une autre ressource

#### 7.2.3.1 Coûts réels de la dégradation du service

Pour compenser le manque d'eau dû à une trop forte turbidité, l'utilisation d'une autre ressource peut être nécessaire : soit les autres captages superficiels du réseau, soit les forages.

Pour les communes de Nouméa et du Mont-Dore, un achat supplémentaire d'eau du Grand Tuyau est nécessaire pour diluer les eaux trop turbides, et maintenir une bonne efficacité du traitement. Or l'eau amenée du grand tuyau revient plus cher car issue d'un champ captant de forages, situé à 60 km de l'agglomération, fonctionnant à l'électricité, alors que l'approvisionnement du barrage et des captages superficiels se fait majoritairement en gravitaire. Cependant, les volumes supplémentaires achetés à la SADET lors d'épisodes pluvieux ne sont pas forcément connus des communes.

La ressource de secours utilisée peut également être un forage, plus cher à la construction bien que la différence de coût exacte par rapport à la construction d'un captage superficiel n'ait pas pu être déterminée.

Un forage a également un coût énergétique élevé dû au fonctionnement des pompes de forage, et des pompes de refoulement vers le réseau. Si on considère seulement les pompes de forages, en 2015, 3 725 000 m<sup>3</sup> d'eau ont été produits par le champ captant, nécessitant la consommation d'environ 466 000 KWh (en moyenne 0.125 KWh/m<sup>3</sup> pompé, communication personnelle, SIGN). Cela représente une facture d'électricité de plus de 10 millions de francs (en considérant un prix approximatif de 22 F/KWh, tarifs Enercal pour les professionnels), soit plus de 80 000 euros. En totalisant la consommation des pompes de forages et de refoulement à l'usine de traitement de la Tontouta, la facture s'élève à presque 60 millions de F CFP, soit 16 F/m<sup>3</sup>, qui se répercutent sur la facture de consommation d'eau des habitants du Grand Nouméa. L'eau est facturée 66 F/L au abonnés de Nouméa mais il n'a pas été possible de déterminer la proportion du prix caractérisant l'eau du barrage ou l'eau du Grand Tuyau.

Dans d'autres communes, un maillage des unités de distributions permet d'utiliser l'eau des captages non impactés, chiffrés à 15 millions en zone rurale, et jusqu'à 100 millions de F CFP en zone urbaine par kilomètre de canalisation (DAVAR, 2018). Cependant, il faudrait connaître le linéaire de canalisations de chaque commune pour estimer de manière plus précise les coûts réels engagés.

Enfin, un autre type de ressource exploitable, bien qu'encore marginal, est l'eau de mer, comme c'est le cas sur l'atoll corallien d'Ouvéa, où 3 unités de dessalement approvisionnent les 3400 habitants en eau potable lorsque l'eau de pluie n'est pas suffisante. La construction de la première usine a coûté 120 millions de F CFP (1 million d'euros), la distribution est assurée en permanence par des camions citernes tournant en continu à un prix de vente de 500 F CFP/m<sup>3</sup>, soit presque 8 fois plus qu'à Nouméa (66 F/m<sup>3</sup>). Le coût d'investissement mais aussi énergétique et environnemental de ce genre d'installation reste donc très élevé par rapport aux captages d'eau (Les Nouvelle Calédoniennes, 2017).

### 7.2.4 Surcoûts d'un manque de ressource

#### 7.2.4.1 Coûts de remplacement du service

Lorsqu'une ressource est inutilisable car la turbidité est trop importante (la limite étant généralement fixée à 5 NTU), et que l'utilisation d'une ressource de secours n'est pas possible, l'adduction doit être coupée, il y a donc une pénurie d'eau (PSSE).

En cas de pénurie, un approvisionnement des habitants par de l'eau en bouteille ou camion-citerne est évoqué dans les PSSE. Cependant, d'après certaines mairies ayant répondu, l'eau peut être coupée jusqu'à plusieurs jours (voire 4 semaines en octobre 2016 pour certaines tribus de Ouégoa, Les Nouvelles Calédoniennes, 2016) sans proposer de solution d'approvisionnement de secours.

On peut cependant estimer le coût que représenterait l'approvisionnement des communes par de l'eau en bouteille, à 150 F/L (observatoire des prix de la Nouvelle Calédonie, prix moyen 220 F la bouteille de 1.5 L) et 20 L/j/personnes recommandés par l'OMS, soit 3 000 F / jour / personne. Sur une base de 1000 habitants, cela représenterait 3 000 000 F CFP (25 000 euros) par jour.

### 7.2.5 Surcoûts sanitaires

Pour les communes ne disposant pas de moyens de traitement de l'eau, les matières en suspension pouvant servir de support aux bactéries, leur augmentation pourrait être associée à des épidémies de gastro-entérites par exemple, ce qui représente un coût médical (accueil en dispensaires, traitements) supporté par le contribuable. Les données sur d'éventuelles épidémies et leurs causes ne sont cependant pas transmises par les communes à la DASS, il n'a donc pas été possible de déterminer ce coût.

## 7.3 SERVICE DE REGULATION DE LA QUALITE DE L'EAU PAR FILTRATION/AUTOEPURATION

### 7.3.1 Coûts de remplacement du service

Les bassins versants des captages superficiels étant situés dans la chaîne centrale, ils sont très peu soumis aux pollutions diffuses dues à l'exploitation agricole. Les forages et captages essentiellement situés dans la nappe alluviale de la côte Ouest plus agricole, pourraient être plus touchés. Certaines communes comme la zone Voh-Koné-Pouembout, Boulouparis et La Foa, mentionnent un risque de pollutions aux effluents agricoles dans leurs PSSE mais il n'est fait mention d'encore aucun cas de contamination avérée, l'eau étant généralement diluée avec une eau saine pour faire diminuer le taux de nitrates (DAVAR). Seuls les forages de Val Fleuri et Val Suzon, sur la commune de Dumbéa ont dû être abandonnés à cause de quantités trop importantes de nitrates (CDE, 2018). Une des conséquences d'une pollution aux effluents agricoles serait donc l'abandon d'un forage, et la recherche d'une autre ressource.

Le coût de traitement de potabilisation d'eau contaminée aux nitrates peut être estimé à 36 F/m<sup>3</sup> (0,3 euros/m<sup>3</sup>, EFESE, 2017). Il aurait été intéressant de calculer le coût du traitement de l'eau provenant des forages de la plaine alluviale de la côte Ouest, mais le nombre de m<sup>3</sup> produits spécifiquement par les forages n'a pas pu être obtenu. En appliquant ce chiffre au volume produit par le champ captant de la Tontouta en 2015, cela représenterait un coût de **134 millions de francs** (plus d'un million d'euros).

## 7.4 SERVICE DE SOUTIEN AUX ETIAGES : METHODE DES COUTS DIRECTS

### 7.4.1.1 Coûts de remplacement du service

En Nouvelle-Calédonie, plusieurs communes sont sujettes chaque année à des épisodes de pénuries d'eau, et de nombreux creeks se tarissent. Sur les 94 captages superficiels recensés dans les PSSE de 10 communes entre 2015 et 2017, 41 (soit plus de 40 %) présentent un risque de manque d'eau dû à un étiage sévère en période sèche.

Pour pallier au manque d'eau, on retrouve les mêmes options que pour le service de stabilisation des sols : l'utilisation d'une autre ressource, ou une pénurie d'eau.

Ce service est difficile à estimer, car le rôle de la forêt dans la recharge des aquifères et le soutien aux étiages n'est pas défini de manière générale, et très influencé par la géologie, et les précipitations (Frysou, 2008). Son estimation nécessiterait une étude plus fine des capacités de stockage du sol, des pertes par évapotranspiration et des processus hydrologiques propres à chaque bassin versant, selon le type de substrat géologique. Ce genre de données étant très variable localement, il ne paraît pas pertinent d'appliquer des résultats provenant d'autres études (EFESE, 2017). Les déficits en eau peuvent également être liés à des prélèvements supplémentaires non contrôlés ou trop important. Le service de soutien d'étiage des forêts du bassin versant du Lac de Yaté pour le barrage hydroélectrique a été estimé à 114 702 F CFP /ha/an dans le cadre du projet RESCCUE (RESCCUE, 2016), mais cela constitue un cas particulier affecté à une production d'énergie et non d'eau potable, qui ne peut pas être applicable à toutes les forêts ultramaïques.

Une des méthodes permettant de déterminer les coûts des conséquences des sécheresses est d'estimer le coût des moyens artificiels de mobilisation de ressource (EFESE, 2017) : la construction du Grand Tuyau par exemple, a coûté 7 milliards de francs, pour répondre à l'augmentation des besoins en eau du Grand Nouméa d'ici à 2030 (mais il est actuellement utilisé à 10 % de sa capacité), car le barrage, qui par ailleurs a perdu près du tiers de sa réserve utile depuis sa construction dans les années 70, ne suffit pas à l'approvisionnement en eau de la commune.

## **7.5 BILAN**

### **7.5.1 Récapitulation des différents surcoûts**

Le tableau ci-dessous récapitule les conséquences des différentes pertes de services évoqués ci-dessus, ainsi que les principaux coûts déterminés.

Tableau 13: Tableau récapitulatifs des surcoûts entraînés par la perte de services écosystémiques (en bleu : nombres ayant servi pour calculer le total)

Perte du service	Stabilisation des sols		Stabilisation des sols / soutien aux étiages		Filtration de l'eau	
Conséquences	Augmentation de la turbidité		Augmentation de la turbidité / sécheresse		Contamination aux polluants	
Surcoûts entraînés	Traitement	Entretien	Ressource de secours	Distribution d'eau	Traitement	Abandon de la ressource
Coûts réels (XPF)	3,1 millions (Station du Mont Té, 2017)	960 millions (curage du barrage de la Dumbéa)	Construction du Grand Tuyau : 7 milliards  Forage : 59,4 millions (facture d'électricité du SIGN en 2015)  10-15 millions (prix de construction d'un forage)  Captage : 15 à 100 millions / km de canalisations	---	---	10-15 millions (prix de construction d'un nouveau forage)
Coûts de remplacement (XPF)	4,5 milliards (construction et fonctionnement de stations de décantation)	---	---	260 000/ jour (achat de bouteilles d'eau pour 1000 habitants)	134 millions (traitement au champ captant de la Tontouta, 2015)	---
Total	<b>&gt; 12,8 Milliards</b>					

### 7.5.2 Paiement pour service écosystémique

La notion de paiement pour maintien du service écosystémique consiste, pour l'exemple de la forêt, à rémunérer les propriétaires forestiers qui maintiennent leur forêt dans un bon état de conservation ou qui pratiquent une activité respectueuse de la protection de la ressource en eau (Chevassus et Pirard, 2011 ; Ferry, 2006).

On pourrait ainsi imaginer qu'une partie du prix de l'eau potable soit reversée aux entités gestionnaires des bassins versants des captages : les coutumiers ou les services publics de gestion des forêts comme la DDR en province Sud et la DDEE en province Nord. Sur la base d'un cahier des charges, ces fonds pourraient servir à limiter les feux dans les bassins versants, appliquer une pression de chasse contre les espèces envahissantes, inciter à la pratique d'une agriculture raisonnée, engager des actions de reboisement... Une faible augmentation du prix de l'eau pourrait au final permettre une diminution des coûts globaux de gestion de l'eau évoqués précédemment. Pour déterminer un prix de rémunération acceptable, il faudrait cependant déterminer plus précisément le surcoût global évité (au moins pour une eau trop turbide ou soumise aux pollutions agricoles) quand le bassin versant est en bon état, par mètre cube, ainsi que les coûts de restauration des bassins versants.

Cette étude propose quelques éléments de chiffrage des surcoûts liés à la dégradation de la qualité de l'eau, ou la diminution de la quantité, en lien avec une dégradation de la forêt dans les PPE. La valeur totale obtenue, représente un minimum car de nombreuses données étaient manquantes pour calculer une valeur plus précise. Même si une partie des coûts a été établie dans l'hypothèse d'une perte totale du service (méthode des coûts de remplacement), certaines communes mettent déjà en place des traitements supplémentaires de l'eau et une recherche de ressource de secours (coûts réels). Il reste cependant délicat de déterminer quelle proportion de

ces coûts sont réellement attribuable à la dégradation des forêts : l'augmentation de turbidité y est bien corrélée, mais les étiages sévères par exemple ne peuvent pas être y être entièrement imputés, d'autres mécanismes rentrant en jeu.

Cela permet surtout de montrer qu'une forte dégradation des forêts dans les PPE pourrait être à l'origine de dysfonctionnements importants au niveau des captages superficiels tant sur la qualité que sur la disponibilité en eau, engendrant des coûts insupportables pour les communes, et des risques sanitaires. D'autre part, la prise en compte des autres usages de l'eau : agricole, industriel et touristique, serait nécessaire pour compléter le chiffrage des services rendus par la forêt pour la ressource en eau de manière générale.

De plus, dans un contexte d'augmentation démographique, de développement touristique, de développement planifié de l'agriculture, et de changement climatique, les besoins en eaux risquent d'être de plus en plus importants à l'avenir, tout comme les risques de dégradation de la ressource.

Au lieu de répondre à l'augmentation des pics de turbidité par la construction de décanteurs, et aux sécheresses par la recherche permanente d'autres ressources, un investissement plus sûr serait d'agir directement à la source de ces dégradations, dans les bassins versants, sur les menaces principales pesant sur les forêts humides, ou d'entreprendre une restauration des bassins versants les plus dégradés.

# Conclusion

---

L'étude statistique des corrélations entre l'état de fonctionnalité du couvert forestier n'a pas donné de résultats probants validant nos hypothèses, car les données recueillies n'étaient pas les plus adaptées. Elle a cependant permis de mettre en évidence des pistes de réflexion qui pourraient être développées, notamment la redéfinition des seuils statistiques des classes de variables nécessaires à l'établissement du diagnostic, qui pourraient être plus proches de la réalité de terrain, et correspondre à une réelle diminution de la qualité de l'eau. Ces seuils seraient peut-être variables en fonction des caractéristiques des bassins versants cependant. La relation entre couvert forestier et qualité de l'eau paraît également indissociable de l'état du sous-bois et la présence d'une éventuelle ripisylve, qui seraient impérativement à prendre en compte dans le cadre d'études plus poussées, ou de mise en place du type de protocole proposé. Concernant l'état du sous-bois, il apparaît nécessaire de mener des études de terrains permettant de le caractériser (abrouissement, indices de dégradation de la litière), les technologies satellites étant actuellement trop coûteuses. Une évaluation de la population de cerfs serait également à mettre en place, mais ne faisait pas l'objet de cette étude. Une géologie plus fine permettrait peut-être également de préciser les mécanismes de mobilisation des métaux, qui, au vu des résultats des analyses, pourraient être présents dans l'eau de consommation, particulièrement pour des bassins versants très érodés et à dominante de sols nus.

Un manque de données a été mis en évidence à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie, en effet, certaines communes ne font pas d'analyse à la ressource et/ou ne traitent pas l'eau distribuée, impossible donc de connaître la qualité de la ressource et d'agir sur les causes de pollution possible. La quantité de ressource n'est pas non plus suivie. Nous avons donc pointé la nécessité de mettre en place un observatoire de l'eau à l'échelle du pays, qui permettrait une meilleure appréhension et gestion des menaces pesant sur la ressource, et une mutualisation des données pour mieux informer les utilisateurs.

Si l'impact de la forêt sur la disponibilité de l'eau potable a été au final peu abordée dans le rapport, du fait d'un manque de donnée et du rôle toujours discuté des forêts dans le soutien aux étiages, la dégradation du couvert entraîne des coûts réels de gestion de l'eau en lien avec l'augmentation des apports terrigènes. Les communes, dont certaines peinent déjà à distribuer de l'eau à tous leurs abonnés, supportent actuellement des coûts supplémentaires de traitement de l'eau, de construction de stations de décantation, d'utilisation d'une ressource de secours, de pénuries etc... au lieu d'orienter leurs efforts dans la protection des forêts de captages et la restauration des bassins versants dégradés. Il serait par ailleurs intéressant de comparer les coûts de restauration d'un bassin versant dégradé aux coûts de gestion de l'eau entraînés par la dégradation, mais dans tous les cas cela constituerait un investissement plus sûr, car dans le contexte actuel de développement démographique, touristique, agricole, additionné aux effets du changement climatique, les besoins sont amenés à augmenter, et la ressource à être fragilisée si les efforts ne sont pas concentrés pour sa protection.

# Bibliographie

---

- ABILDTRUP J., GARCIA S., & STENGER A., 2011. The effect of forest land use on the cost of drinking water supply: A spatial econometric analysis. *Ecological Economics* 92 (2013) 126–136. 11 pages.
- ANDREASSIAN V., 2004. Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *LA HOUILLE BLANCHE* /N° 2-2004. 5 pages.
- ANDREOLI R., CIESLAK J.-D., VAN HAAREN B., & GERAUX H., 2016. Diagnostic de la couverture forestière et des services écosystémiques des Périmètres de Protection Eloignée des Captages d'Eau sur la Grande Terre et l'Île des Pins en Nouvelle-Calédonie. Rapport d'expertise BLUECHAM SAS/WWF, Nouméa, Nouvelle-Calédonie. 102 pages.
- BERTAUD A., 2013. Suivi des pressions associées à l'érosion dans les milieux naturels : panorama des principales méthodes de suivi. Rapport réalisé par l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie. Nouméa, Nouvelle-Calédonie. 76 pages.
- BONNEFOIS O., 2010. Protocole de suivi et de cartographie des impacts du cerf rusa (*Rusa timorensis russa*) sur les habitats naturels de la Grande Terre, Nouvelle -Calédonie. Etude de faisabilité à l'échelle du bassin versant de la Foa. Rapport de stage de 2ème année « ingénieur agronome », SupAgro, Montpellier. 64 pages.
- BONVALLOT J., GAY J.-Ch., & HABERT E. (coord.), 2012. Atlas de la Nouvelle-Calédonie. Marseille-Nouméa : IRD-congrès de la Nouvelle-Calédonie. 272 pages.
- CAZE N., & JOBIN P., 2009. - Macro-schéma d'assainissement de la Nouvelle Calédonie. Etat des lieux et diagnostic. N/Réf : 061/08/E/NC Rapport n°1. 143 pages.
- CHERRIER J-F., 1981. Le Niaouli en Nouvelle-Calédonie. *Revue Forestière Française* XXXIII4-1981. 15 pages.
- CHEVASSUS B., & PIRARD R., 2011. Les services écosystémiques des forêts et leur rémunération éventuelle. *Revue Forestière Française* LXIII - 5-201. 21 pages.
- CNRT NICKEL, 2016. Synthèse bibliographique des études de biosurveillance des populations vivant en zones minières ou à proximité d'industries émettrices de métaux. Rapport d'avancement. 40 pages.
- CNRT NICKEL, 2017. Niveaux d'imprégnation et déterminants de l'exposition humaine aux métaux en Nouvelle-Calédonie. Synthèse. 9 pages.
- COLLECTIF ICONE, 2015. Eléments de cadrage pour une stratégie de régulation des cerfs sauvages et des cochons féroces envahissants en Province nord. Rapport final du projet ICONE, Province Nord. 114 pages.
- COSANDEY C., 2004. Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. De la forêt à l'eau. *Revue forestière française* LVIII - 4-2006. 12 pages.

- DAVAR, La mise en place de périmètres de protection autour des captages destinés à la consommation humaine. 2 pages.
- DAVAR, La répartition des compétences En matière de gestion et protection de la ressource en eau. 1 page.
- DAVAR, Les thématiques réglementées relatives à la ressource en eau. 1 page.
- DUFOUR S., & PIEGAY H., 2006. Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves : spécificités, fonctions et gestion. De la forêt à l'eau. Revue forestière française LVIII - 4-2006. 12 pages.
- DUMAS P., & COHEN O., 2014. Influence de la susceptibilité à l'érosion hydrique des bassins-versants sur l'évolution du rivage : exemples dans le sud de la Nouvelle-Calédonie. Université de la Nouvelle-Calédonie. 11 pages.
- DUPRAS J., REVERET J-P., & HE J., 2013. L'évaluation économique des biens et services écosystémiques dans un contexte de changements climatiques - Un guide méthodologique pour une augmentation de la capacité à prendre des décisions d'adaptation. Comité Ouranos, Canada. 218 pages.
- EAUFRANCE., 2013. La surveillance des milieux aquatiques et des eaux souterraines. Synthèse numéro 8 : La reconquête du bon état des eaux et des milieux aquatiques, de l'état des eaux en 2009 aux objectifs 2015. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA). 4 pages.
- EFESE, 2017. L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques. Ministère de la transition écologique et solidaire, IRSTEA. 88 pages.
- FERRY O., 2006. Quels contrats pour une forêt au service de l'eau ? Quelques enseignements du projet Life *forests for water*. Les hommes, l'eau et la forêt. Revue Forestière Française LVIII - 4-2006. 9 pages.
- FIQUEPRON J., GARCIA S., & STENGER A., 2013. Land use impact on water quality: Valuing forest services in terms of the water supply sector. *Journal of Environmental Management* 126 (2013) 113-121. 10 pages.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION, 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010, Rapport national, Nouvelle-Calédonie. 89 pages.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION. Les forêts et la qualité de l'eau [En ligne]. Disponible sur : <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/012/i0410f/i0410f04.pdf>. (Consulté le 25/03/2018).
- FORESTRY COMMISSION. Forests and water guidelines, 3th edition. London: The Stationery Office,
- FRYSOU O., 2008. Caractérisation des régimes d'étiage en Nouvelle-Calédonie. Rapport de synthèse. DAVAR, SESER, ORE, Nouméa. 29 pages.
- GIORDANO A., 1994. L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne. Forêt méditerranéenne t. xv, n° 1, janvier 1 994. 10 pages.
- HANNOUCHE A., CHEBBO G., RUBAN G., TASSIN B., & JOANNIS C., 2010. Relation entre la turbidité et les matières en suspension en réseau d'assainissement unitaire. *Techniques Sciences Méthodes, ASTEE/EDP Sciences*, 2011, 2010 (10), pp.42-51. 10 pages.

- JEANPERT J., 2010. Hydrogéologie des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. Bilan des connaissances et hypothèses de travail. DIMENC, Nouméa. 49 pages.
- LECHEVALLIER M-W., SEIDLER R.J., & EVNS T.M., 1981. Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water. Applied and Environmental Microbiology 1981 Jul; 42(1): 159–167. Vol.42, N°1. 9 pages.
- MANO V., 2008. Processus fondamentaux conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues – Optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique. Hydrologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008.Français. 342 pages.
- MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MAE), 2005. Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire. 59 pages.
- OBSERVATOIRE DE L'ENVIRONNEMENT, Biodiversité [En ligne]. Disponible sur : <http://www.oeil.nc/fr/biodiversite> (Consulté le 20/03/2018).
- OFFICE NATIONAL DES FORETS, 2010. Le service de restauration des terrains de montagnes de l'Isère. Plaquette RTM. 4 pages.
- RESCCUE, 2015. Mise en place d'un dispositif de suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion sur le bassin versant de la Thiem (commune de Touho). Communauté du Pacifique, Nouméa. 55 pages.
- RESCCUE, 2016. Evaluation des services écosystémiques du Grand Sud, Province Sud de Nouvelle-Calédonie. Communauté du Pacifique, Nouméa. 116 pages.
- REY F., BALLAIS J-L., MARRE A., & ROVERA G. 2003. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. Comptes Rendus Géoscience, Elsevier Masson, 2004, 336 (11), pp.991-998. 9 pages.
- REY F., CHENOST C., & SIMON-TEISSIER S., 2006. Forêt et érosion dans les bassins versants torrentiels. Revue forestière française LVIII - 4-2006. 10 pages.
- ROBINSON M., & COSANDEY C., 2002. Impact de la forêt sur les débits d'étiage. LA HOUILLE BLANCHE/N° 3-2002. 6 pages.
- THULER L., 2014. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie. 183 pages. (Thèse de doctorat).
- UNC & IRSTEA, 2014. Convention Hydromine, Rapport de synthèse 2009-2012. 172 pages.
- VILLE DE NOUMEA, 2016. Rapport sur le prix et la qualité du service de l'eau potable, Synthèse. 38 pages.
- WERY C., 2010. En Nouvelle-Calédonie, joyau de la biodiversité, les cerfs font des ravages, AFP [en ligne]. Disponible sur : <https://www.7sur7.be/7s7/fr/2668/Especes-Menacees/article/detail/1066203/2010/02/11/En-Nouvelle-Caledonie-les-cerfs-font-des-ravages.dhtml>. (Consulté le 25/07/2018)

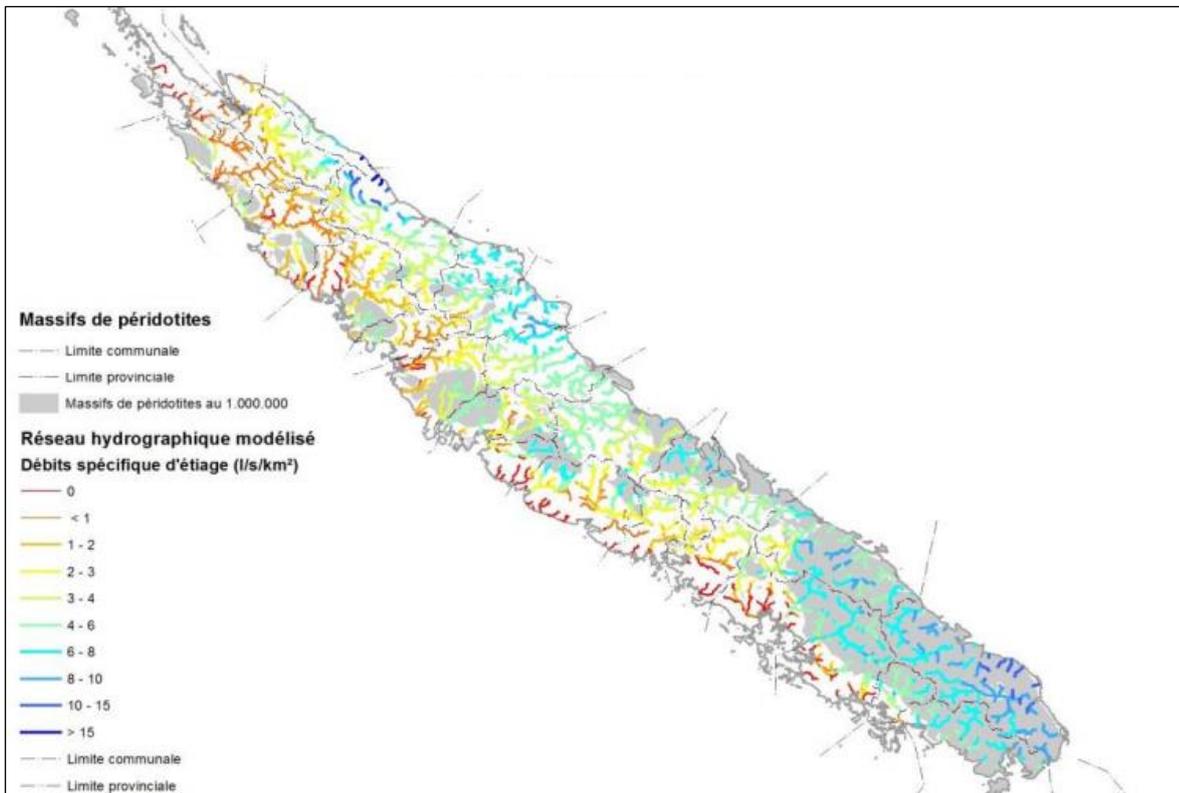
# Annexes

---

## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Carte de l'emplacement des massifs de péridotites et débit critiques d'étéage.....	71
Annexe 2 : Détail de l'étude PPCE .....	72
Annexe 3 : Carte du résultat du diagnostic 2018 .....	78
Annexe 4 : Identification du risque sanitaire et évaluation du niveau de risque.....	79
Annexe 5 : Résultats de la régression linéaire multiple et analyse graphique des résidus (Exemple du Chrome) .....	81
Annexe 6 : Boxplots des distributions de Cr, Ni et Turbidité en fonction des facteurs influençant. 83	
Annexe 7 : Résultats détaillés de l'ACP (Base de données totale) .....	86
Annexe 8 : Résultats détaillés de l'ACP (Bassins versants <50km <sup>2</sup> ).....	90
Annexe 9 : Résultats détaillés de l'ACP (Bassins versants < 20km <sup>2</sup> ).....	93
Annexe 10 : Résultats détaillés de l'analyse sur la base de données « pluviométrie » .....	96
Annexe 11 : ACP base de données « pluviométrie » (tous bassins versants) .....	97
Annexe 12 : ACP base de données « pluviométrie » (bassins versants <50km <sup>2</sup> ).....	100
Annexe 13 : ACP base de données « pluviométrie » (bassins versants <20km <sup>2</sup> ).....	103
Annexe 14 : Test du Khi 2 sur la base de données « PSSE ».....	106
Annexe 15 : ACP sur la base de données « PSSE ».....	108
Annexe 16 : étude graphique des discordances entre niveau de risque de turbidité et état de fonctionnalité du bassin versant – Commune de Païta.....	111
Annexe 17 : Détails du calcul de la construction des stations de décantation .....	112

**ANNEXE 1: CARTE DE L'EMPLACEMENT DES MASSIFS DE PERIDOTITES ET DEBITS CRITIQUES D'ETIAGE**



## ANNEXE 2 : DETAILS DE L'ETUDE PPCE

### Caractérisation de l'aléa érosif

La cartographie des pertes potentielles en sol est issue du modèle *RUSLE (Revised Universal SoilLoss Equation)* qui permet de modéliser de manière empirique l'érosion hydrique des sols c'est à dire l'arrachement du sol sur chaque piwel du modèle par l'action de l'eau (pluie et ruissellement) en t/ha/an.

Le modèle *RUSLE* prend en compte 5 paramètres fondamentaux dans les processus d'érosion dont : l'agressivité des précipitations, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur de la pente ainsi que le couvert végétal et les pratiques de conservations. Les valeurs de la carte expriment les pertes en sols annuelles moyennes possibles à long terme (t/ha/an).

### **A = R.K.L.S.C.P**

Avec

**A** est la perte en sol exprimée en tonne/hectare/an.

**R** est le facteur de ruissellement suite aux précipitations

**K** est le facteur d'érodibilité des sols

**L** est la longueur de pente

**S** est la déclivité de la pente

**C** est le facteur de couverture des sols par la végétation

**P** est le facteur des pratiques culturales et pratiques de protection des sols

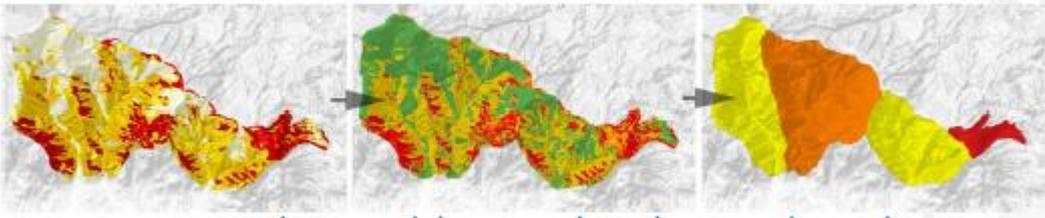
La caractérisation de l'aléa érosif par PPCE consiste à évaluer, pour chaque PPCE, le degré de risque lié à l'aléa érosif à partir de la modélisation *RUSLE*. Une règle de décision prenant en compte les pourcentages de surfaces des classes d'aléa est ensuite appliquée.

- Une classe d'aléa (faible, modéré, fort, extrême) est attribuée à partir de la valeur de perte en sol. Cette étape est effectuée par analyse de la distribution statistique des valeurs de perte en sol modélisée par le *RUSLE* et appuyée par des références bibliographiques de milieux comparables mais également régionales et globales.
- On obtient une cartographie des 4 classes d'aléa érosif sur l'ensemble du territoire
- On calcul la proportion relative de chaque classe d'aléa érosif pour chaque PPCE
- L'analyse statistique de la répartition de chaque classe d'aléa érosif pour l'ensemble des PPCE permet de définir les règles de décision pour classer chaque PPCE dans une classe.

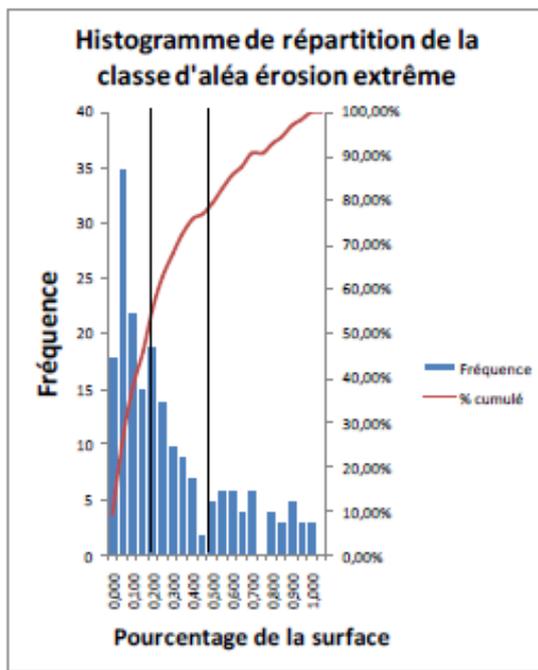
<i>Very low (tolerable)</i>	<6.7 t/ha/an
<i>Low</i>	6.7 –11.2 t/ha/an
<i>Moderate</i>	11.2 t/ha/an – 22.4 t/ha/an
<i>High</i>	22.4 t/ha/an –33.6 t/ha/an
<i>Severe</i>	>33.6 t/ha/an

## Définition des classes d'aléa érosif à partir de la perte en sols modélisée par RUSLE

- Analyse de la distribution des valeurs de perte en sol estimées par le modèle RUSLE UNC par boxplot.
- Définition des seuils de caractérisation de l'aléa érosif : Les valeurs seuil retenues correspondent aux 3 quantiles caractéristiques de la distribution statistiques des valeurs estimées de pertes en sols, ce qui concorde avec les seuils de classes d'érosion répertoriés dans la bibliographie.



- Intégration au sein de chaque PPCE le pourcentage de surface de chaque classe d'aléa
- Analyse des distributions de chaque classe (histogrammes des fréquences de pourcentage de couverture des PPCE pour chaque classe d'aléa) : mise en évidence de seuils naturels de ressemblance entre PPCE, permettant de définir les règles de décision pour caractériser l'aléa érosif global du PPCE.

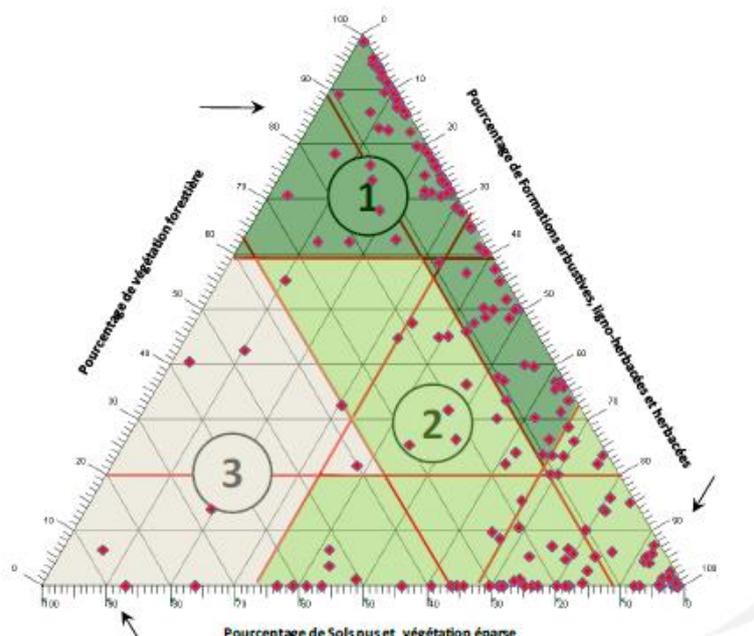


Pourcentage de surface de l'aléa dans le PPCE	Classe affectée au PPCE
<ul style="list-style-type: none"> <li>Aléa érosif faible &gt; 22% et aléa érosif extrême = 0 %</li> </ul>	<b>Aléa érosif faible à modéré</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Aléa érosif extrême &gt; 0% et Aléa érosif extrême ≤ 18% et aléa érosif faible ≤ 22%</li> <li>Ou aléa érosif fort &gt; 48% et Aléa érosif extrême &gt; 0% et Aléa érosif extrême ≤ 18%</li> <li>Ou Aléa érosif extrême &gt; 18% et Aléa érosif fort &gt; 0 et Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré &gt; 29%</li> <li>Ou Aléa érosif extrême + Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré &gt; Aléa érosif faible et Aléa érosif extrême &lt; Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré</li> </ul>	<b>Aléa érosif modéré à fort</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Aléa érosif extrême &gt; 50 %</li> <li>Ou Aléa érosif extrême &gt; 18% et aléa érosif fort &gt; 48%</li> <li>Ou Aléa érosif extrême + Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré &gt; Aléa érosif faible et Aléa érosif extrême &gt; Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré</li> <li>Ou Aléa érosif extrême + Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré &gt; 79% et Aléa érosif modéré &lt; Aléa érosif fort + Aléa érosif extrême</li> <li>Ou Aléa érosif extrême &gt; 18% et Aléa érosif fort &gt; 0 et Aléa érosif fort + Aléa érosif modéré &lt; 29%</li> </ul>	<b>Aléa érosif fort à extrême</b>

### Caractérisation de la tendance paysagère

Pour caractériser la tendance paysagère, on suit les mêmes étapes que précédemment :

- Regroupement de l'occupation des sols à l'échelle de chaque pixel en grandes classes de végétation (forêts sur substrats ultramafiques et volcanosédimentaire, formations arbustives, ligno-herbacées et herbacées comprenant le maquis et les savanes, et enfin les sols nus et végétation éparses sur les deux types de substrat),
- Analyse la distribution spatiale par des histogrammes de fréquence de pourcentage de couverture de chacune de ces grandes classes au sein de chaque PPCE afin de définir une règle de décision permettant de caractériser la tendance paysagère de chaque PPCE ;
- Mise en œuvre la règle de décision mise au point pour chaque PPCE (triangle de dominance établi à partir des pourcentages de couverture de chaque classe, et divisé selon les seuils extraits des histogrammes.



Pourcentage de surface d'occupation du sol dans le PPCE	Classe de tendance paysagère
<ul style="list-style-type: none"> <li>Couverture de végétation forestière &gt; 59 %</li> <li>Ou couverture de végétation forestière ≤ 59% et couverture des formations arbustives et assimilées &gt; 33% et couverture des formations arbustives et assimilées ≤ 68% et couverture des formations éparses et sols nus ≤ 11 %</li> </ul>	<b>tendance paysagère 1</b> : milieu dominé par des formations arborées et arbustives.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Couverture des formations arbustives et assimilées &gt; 68%</li> <li>Ou couverture de végétation forestière ≤ 59% et couverture des formations éparses et sols nus ≤ 36 % et couverture des formations éparses et sols nus &gt; 11 %</li> <li>Ou couverture de végétation forestière ≤ 59% et couverture des formations arbustives et assimilées &gt; 33%</li> </ul>	<b>tendance paysagère 2</b> : mosaïque de formations arborées, arbustives et herbacées avec présence de sols nus, et prédominance des formations arbustives et herbacées.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Couverture de végétation forestière ≤ 59% et couverture des formations éparses et sols nus &gt; 36 % et couverture de végétation forestière &gt; 20%</li> <li>Ou Couverture forestière ≤ 20% et couverture des formations arbustives et assimilées ≤ 33%</li> </ul>	<b>tendance paysagère 3</b> : milieu ouvert avec présence importante de sols nus, dont la végétation majoritaire est éparses et constituée de formations herbacées, avec quelques formations arbustives et arborées résiduelles.

### Caractérisation de la fragmentation des forêts

Deux indicateurs ont été retenus pour caractériser la fragmentation des forêts, basés sur des références scientifiques (formules de Hurd, Wilson et Civco, 2002 ; Ritters et al., 2000 ; Mouhamadou et al., 2012). Ces indices renseignent sur la fragmentation des objets en analysant le nombre de taches et d'îlots de forêts, la présence de forêts individuelles dominantes, la forme des forêts et leur diversité au sein des PPCE. En effet, l'augmentation du nombre de taches d'une classe et une forme très découpée sont autant d'indicateurs de fragmentation de cette classe (Davidson 1998).

Indice de forme :

$$IF_j = \frac{P_{tj}^2}{a_{tj}}$$

Avec  $P_{tj}$  = périmètre total de la classe j, et  $a_{tj}$  l'aire totale de la classe j.

Plus les taches ont des formes allongées ou irrégulières, plus la valeur de l' $IF_j$  sera élevée et cette valeur décroîtra à mesure que les formes deviennent circulaires (Bogaert et al. 2000):

- $0 < IF_j < 50$  : objets de forme compacte s'approchant d'une forme circulaire. Un objet parfaitement circulaire a un indice de forme égal à 4 ;
- $IF_j$  proche de 100 : objets de forme se complexifiant progressivement comme par exemple un patch forestier de haut de bassin compact présentant une langue descendant en longeant un creek en fond de talweg ;
- $IF_j > 1000$  : formes complexes et ramifiées.

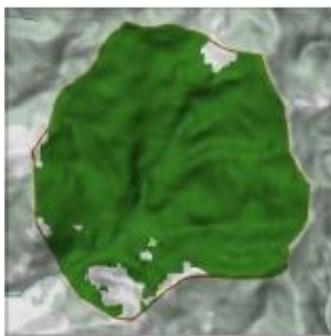
Il ne renseigne cependant que la forme, et non le nombre de patches ou leur hétérogénéité.

Indice de diversité : calculé selon la formule de l'indice de Shannon (Bogaert et Mahamane 2005)

$$H_j(a) = \sum_{i=1}^{n_j} - \left( \frac{a_{ij}}{a_{tj}} \ln \frac{a_{ij}}{a_{tj}} \right)$$

La valeur de  $H_j(a)$  dépend du nombre de taches présentes ( $n_j$ ), leurs proportions relatives et leur hétérogénéité.

- $H_j(a)$  proche de 0 : patches de forêts très peu nombreux et de forme homogène ;
- $H_j(a)$  proche de 1 : légère diversification des types de formes des patches forestiers, nombre peu élevé de patches et de taille homogène ;
- $H_j(a)$  proche de 2 : grande hétérogénéité des patches forestiers, nombre de patches plus important, tailles plus hétérogènes ;
- $H_j(a) > 2$  : forte hétérogénéité de type, de forme et de taille de patches forestiers, nombre important de patches forestiers.



PPCE : DUAHAT  
Commune : VOH  
Indice de dominance : 100  
Indice de forme : 39.067933  
Indice de diversité : 0.010001

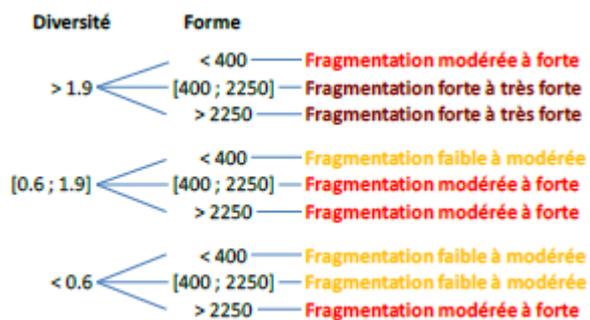


PPCE : QUINDO (Captage)  
Commune : THIO  
Indice de dominance : 95  
Indice de forme : 109.477816  
Indice de diversité : 0.217967



PPCE : COULA à GONDE  
Commune : HOUALOU  
Indice de dominance : 70  
Indice de forme : 965.579707  
Indice de diversité : 0.892504

Puis, de la même manière que précédemment, une analyse de la distribution des valeurs des indices met en évidence des seuils naturels qui regroupent les PPCE par ressemblances, et sont regroupés en 3 classes selon leur indice de forme et 3 classes selon leur indice de diversité.



Les PPCE dont la couverture forestière est nulle sont considérés en fragmentation forte à très forte.

**ANNEXE 3 : CARTE DU RESULTAT DU DIAGNOSTIC 2018**



## ANNEXE 4 : IDENTIFICATION DU RISQUE SANITAIRE ET EVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

Passages extraits du Guide n°2 d'élaboration du PSSE (*Evaluer et gérer le risque sanitaire lié à la production et à la distribution d'eau potable*), proposé par la DASS.

### **Etapes de l'identification du risque sanitaire :**

- Identifier les événements dangereux qui peuvent se produire et les dangers pour chaque élément de l'UD
- Identifier les causes de ces événements dangereux
- Déterminer le niveau de risque
- Déterminer si l'évènement dangereux est contrôlé ou pas

**Danger** : agent physique (sédiments et matières en suspension), chimique (pesticides, nitrates, métaux etc...) ou biologique (organismes pathogènes) qui peut potentiellement nuire à la santé humaine.

**Evènement dangereux** : incident ou situation qui peut entraîner la présence d'un danger dans l'eau.

**Risque** : possibilité qu'un danger nuise à la santé d'une population humaine.

Lors de cette étape, l'équipe doit considérer tous les événements dangereux pouvant être associés à chaque élément de chaque unité de distribution, depuis la ressource jusqu'au robinet, déterminer si le risque est maîtrisé, et s'il ne l'est pas, proposer des solutions d'amélioration de la gestion du risque.

### **Evaluation du niveau de risque**

Le niveau de risque associé à chaque évènement dangereux identifié est calculé à partir de la gravité des conséquences du risque, et la fréquence à laquelle l'évènement dangereux se produit.

Catégories de probabilités		Définition possible :
Régulière (fortes pluies)	5	Réglé comme une horloge, survient chaque semaine, chaque mois, ....
Probable (orages)	4	Suspecté de survenir chaque année
Possible (cyclones)	3	Suspecté de survenir tous les 2 à 5 ans
Rare (fortes sécheresses)	2	Suspecté de survenir tous les 5 à 10 ans
Très peu probable (tsunamis)	1	Suspecté de survenir tous les 10 ans

Catégories de gravité		Définition possible :
Catastrophique	5	Impact majeur sur la Santé Publique, nombreux cas de maladies transmises par l'eau
Majeure	4	Impact majeur sur la Santé Publique et/ou perte d'approvisionnement prolongée. Quelques cas de maladies transmises par l'eau
Modérée	3	Impact modéré sur la Santé Publique ou perte provisoire d'approvisionnement
Mineure	2	Impact mineur sur la Santé Publique ou perte provisoire d'approvisionnement
Insignifiante	1	Impact insignifiant sur la Santé Publique

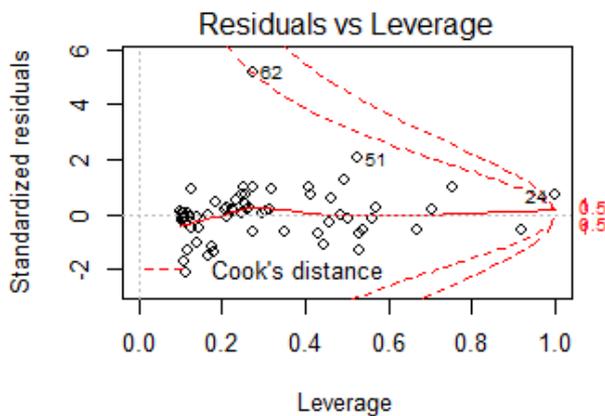
Table du niveau de risque en fonction de la gravité des conséquences et de la probabilité d'apparition

Niveau de risque = gravité x probabilité							
			GRAVITE				
			insignifiante	mineure	modérée	majeure	catastrophique
			1	2	3	4	5
P R O B A B I L I T É	régulière	5	5	10	15	20	25
	probable	4	4	8	12	16	20
	possible	3	3	6	9	12	15
	rare	2	2	4	6	8	10
	Très peu probable	1	1	2	3	4	5

NIVEAU DE RISQUE	
< ou = 3	faible
entre 4 et 6	modéré
entre 7 et 12	élevé
entre 13 et 20	très élevé
> 20	extrême

## ANNEXE 5 : RESULTATS DE LA REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE ET ANALYSE GRAPHIQUE DES RESIDUS (EXEMPLE DU CHROME)

La régression a d'abord été effectuée sur toutes les lignes (67 observations), cependant, l'étude graphique des résidus a mis en évidence 2 individus influençant particulièrement les résultats de la régression. En les enlevant, le R2 ajusté est passé de 0,41 à 0,55...



### Résultats de la régression multiple

```
Call:
lm(formula = Cr ~ ., data = Tab)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.3049  -1.4672  -0.1147   1.4487  12.3679
```

```
Coefficients: (1 not defined because of singularities)
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -8.720e+02  3.734e+02  -2.335  0.023767 *
area_km2     -9.975e-01  4.533e-01  -2.201  0.032612 *
ER_FAI       4.278e+01  3.000e+01   1.426  0.160267
ER_MOD       5.436e+01  2.599e+01   2.092  0.041787 *
ER_FOR       5.063e+01  2.206e+01   2.295  0.026138 *
ER_EXT       NA         NA         NA     NA
P_EPARS      8.862e+02  3.733e+02   2.374  0.021664 *
P_ARBU      8.352e+02  3.691e+02   2.263  0.028195 *
P_FORET     8.430e+02  3.678e+02   2.292  0.026329 *
forme       -1.358e-02  1.722e-02  -0.788  0.434310
diversite   -3.009e+00  1.202e+00  -2.504  0.015734 *
amax_foret  -4.631e-06  3.924e-06  -1.180  0.243789
atot_foret   8.934e-07  4.703e-06   0.190  0.850146
ptot_foret  -3.983e-05  4.923e-04  -0.081  0.935850
nb_patch_f   5.867e-01  1.648e-01   3.561  0.000846 ***
sols_um....  1.542e-01  1.511e-01   1.021  0.312585
ALT         -1.814e-02  8.302e-03  -2.185  0.033815 *
Pente_moy.degrees. -5.047e-01  2.031e-01  -2.485  0.016505 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 4.83 on 48 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6902,    Adjusted R-squared:  0.587
F-statistic: 6.685 on 16 and 48 DF,  p-value: 1.363e-07
```

## Résultat régression descendant pas à pas : modèle final

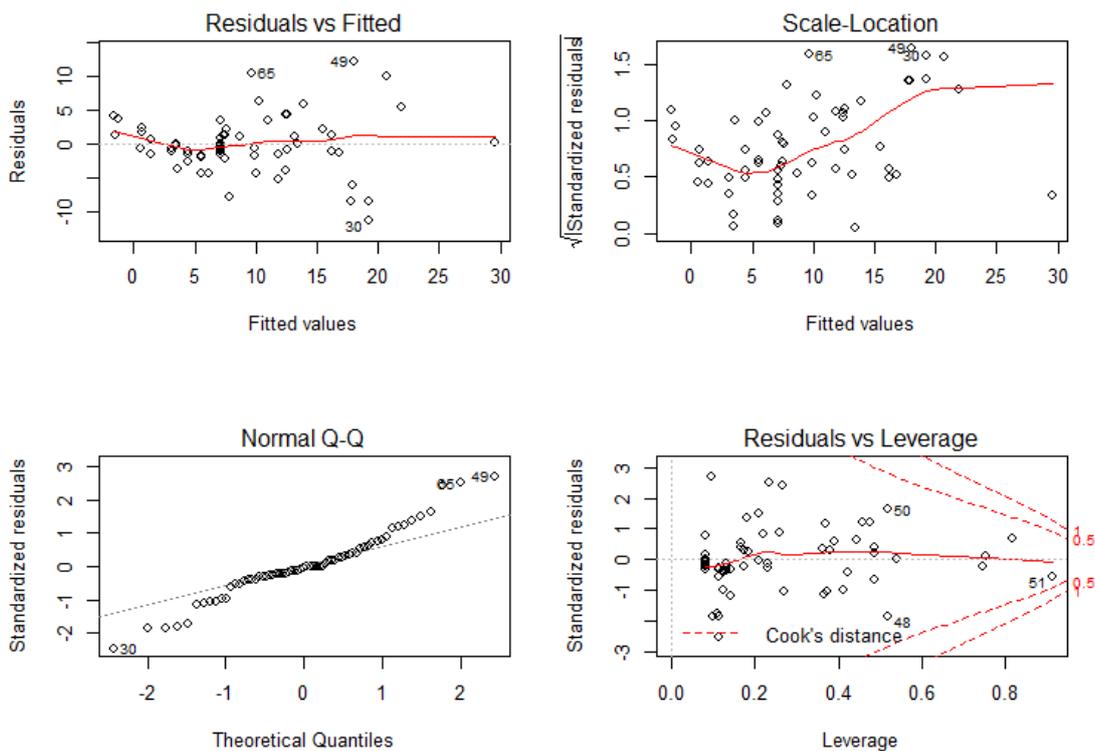
Step: AIC=214.94

Cr ~ area\_km2 + ER\_FAI + ER\_MOD + ER\_FOR + P\_EPARS + P\_ARBU +  
P\_FORET + forme + diversite + amax\_foret + nb\_patch\_f + ALT +  
Pente\_moy.degres.

Coefficients:

(Intercept)	area_km2	ER_FAI	ER_MOD
-8.569e+02	-9.778e-01	4.893e+01	6.143e+01
ER_FOR	P_EPARS	P_ARBU	P_FORET
4.313e+01	8.853e+02	8.275e+02	8.313e+02
forme	diversite	amax_foret	nb_patch_f
-1.309e-02	-2.427e+00	-2.364e-06	5.328e-01
ALT	Pente_moy.degres.		
-1.811e-02	-4.469e-01		

## Vérification des conditions d'application de la régression linéaire : indépendance, homoscedasticité et normalité des résidus.



## ANNEXE 6 : BOXPLOTS DES DISTRIBUTIONS DE CR, NI ET TURBIDITE EN FONCTION DES FACTEURS INFLUENÇANT.

### Script utilisé

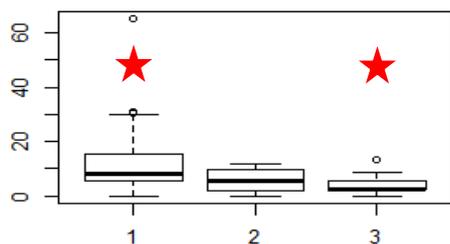
Library(pgirmess)

kruskal.test(Cr, Y)

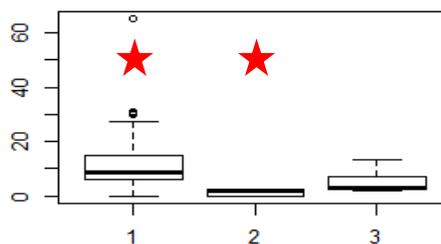
kruskalmc(Cr, Y, probs=0.05, CONT="two-tailed" )

### Facteurs influençant la quantité de Chrome

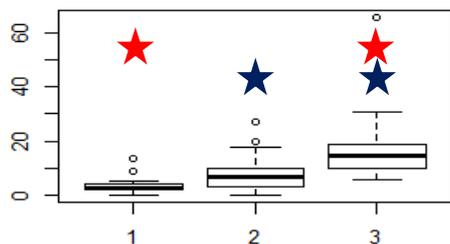
**Chrome - Aléa érosif**



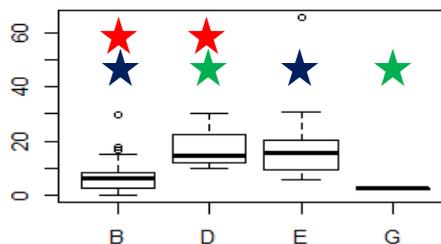
**Chrome - Fonctionnalité**



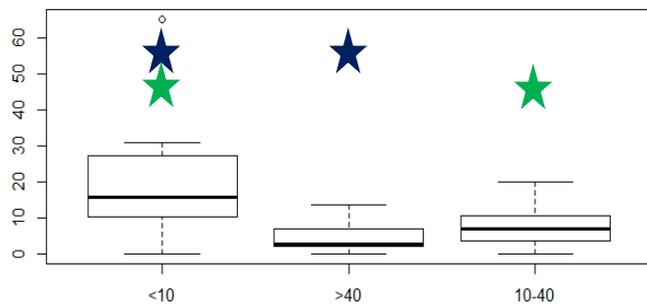
**Chrome - Tendance paysagère**



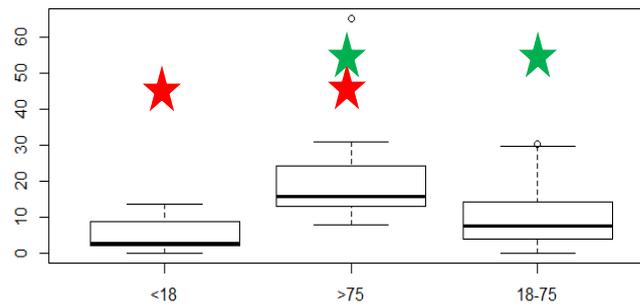
**Chrome - HER**



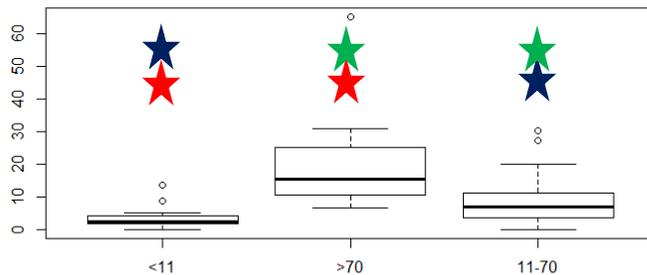
**Cr - ER\_FAI**



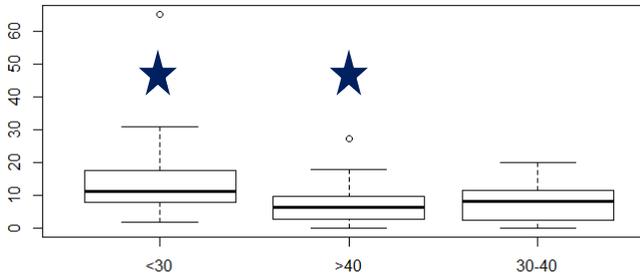
**Cr - ER\_EXT**

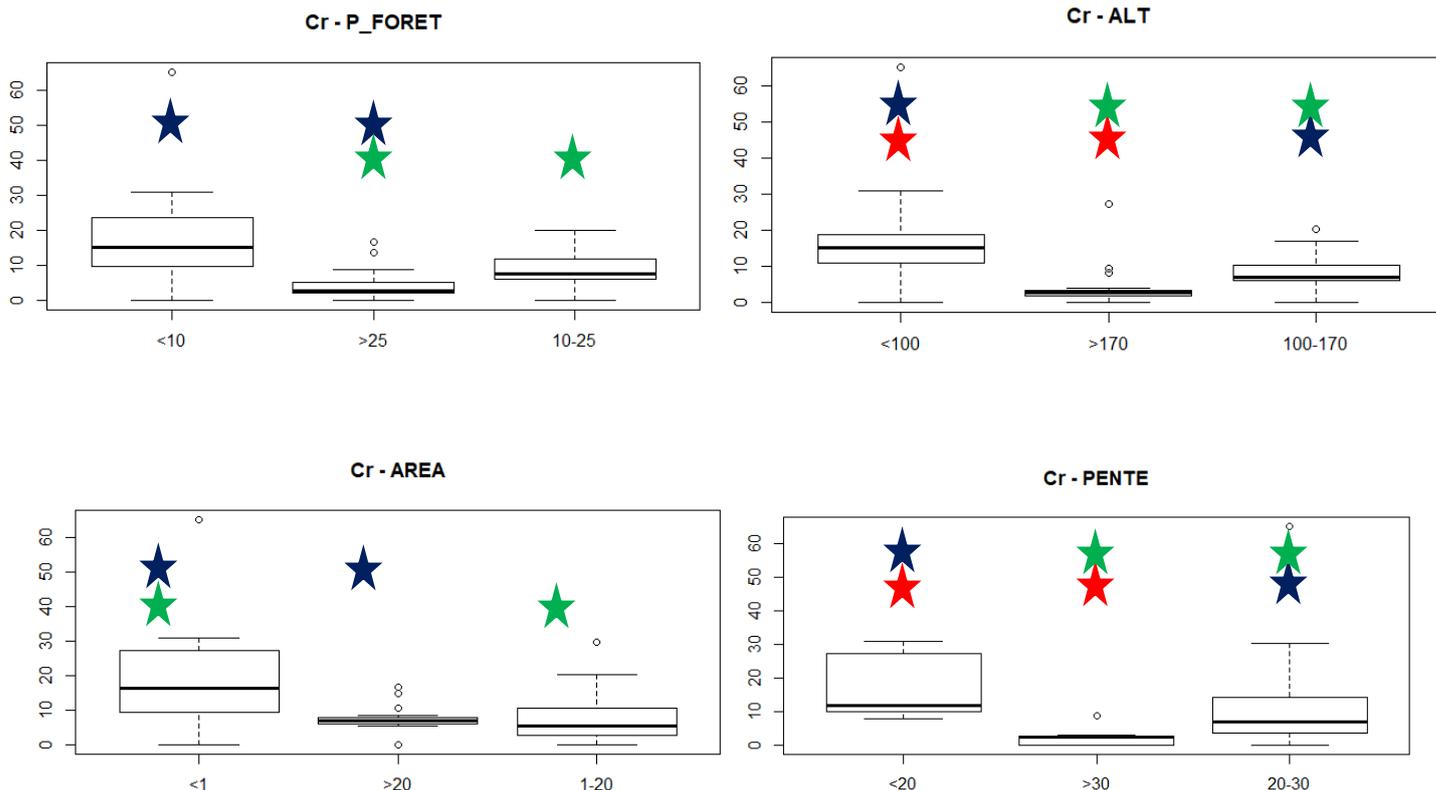


**Cr - P\_EPARS**



**Cr - P\_ARBU**

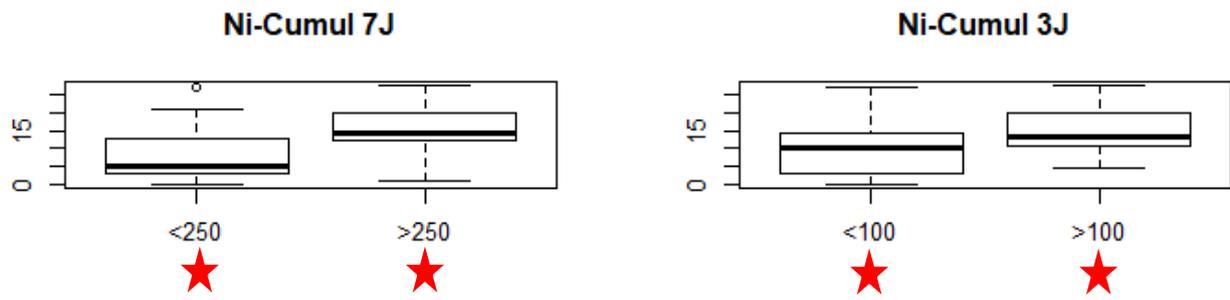




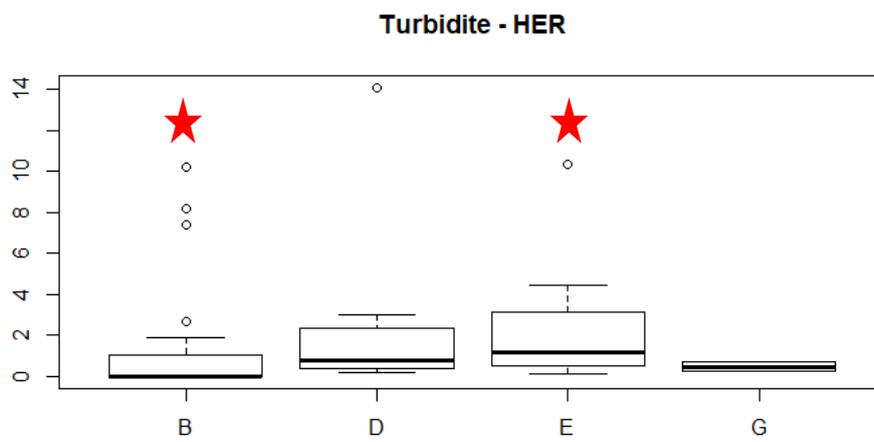
*Test sans individu 126 de la BDD\_UM (pic à 65 µg/L) : presque les mêmes résultats*

Variables influençant le Cr	p-value	Classes différentes
CLASSE_ER_FAI	6.729e-05	<10 et >40 // <10 et 11-40
CLASSE_ER_EXT	0.001827	<18 et >75 // <18 et 18-75
CLASSE_P_EPARS	7.703e-05	<11 et > 70 // <11 et 11-70 // 11-70 et >70
CLASSE_P_ARBU	0.009721	<30 et >40
CLASSE_P_FORET	2.806e-05	<10 et >25 // >25 et 11-25
PRI_ER	0.02305	1 et 3
PRI_OS	1.182e-05	1et 3 // 2 et 3
Fonction	0.001214	1 et 2
CLASSES_ALT	6.237e-07	<100 et >170 // <100 et 100-170 // 100-170 et >170
CLASSES_PENTE	3.039e-05	<20 et >30 // <20 et 20-30 // 20-30 et >30
CLASSES_AREA	0.002854	<1 et 11-20
HER	9.784e-06	B et D // B et E // D et G

Facteurs influençant la quantité de Nickel



Facteurs influençant la turbidité



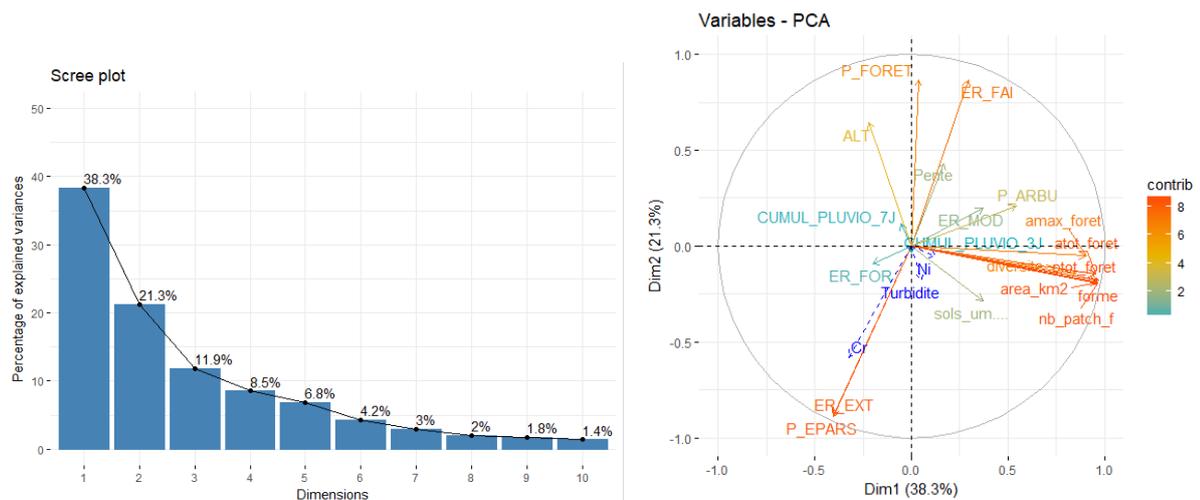
## ANNEXE 7 : RESULTATS DETAILLES DE L'ACP (BASE DE DONNEES TOTALE)

61 observations de 24 variables

### Script utilisé

```
Library(FactomineR), library(Factoextra)
acp=PCA(Tab, quanti.sup=1:3, quali.sup=23:27 ,graph=F)
fviz_eig(acp, addlabels = TRUE, ylim = c(0, 50))
fviz_pca_var(Acp, col.var = "contrib", gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"), repel=TRUE)
```

### Valeurs propres / Cercle de corrélation des variables



### Variables caractérisant les dimensions

dimdesc(Acp, axes = c(1,2), proba = 0.05)

```

$`Dim.1`
$`Dim.1`$`quanti`
correlation      p.value
forme            0.9693627 1.134287e-37
ptot_foret      0.9654058 3.862568e-36
nb_patch_f      0.9625609 3.819993e-35
area_km2        0.9616383 7.732890e-35
atot_foret      0.9526206 3.452670e-32
amax_foret      0.9017038 3.737125e-23
diversite       0.8521444 3.077083e-18
P_ARBU          0.5422185 6.375401e-06
sols_um....    0.3725402 3.109834e-03
ER_MOD          0.3711917 3.228213e-03
ER_FAI          0.2948772 2.105619e-02
Cr              -0.3247519 1.066336e-02
ER_EXT          -0.4022922 1.309162e-03
P_EPARS        -0.4043608 1.229038e-03
PRI_FRAG       -0.5955413 4.132438e-07

$`Dim.1`$quali
R2      p.value
HER 0.2083015 0.003797812

$`Dim.1`$category
Estimate      p.value
B 1.7923342 0.0002355118
E -0.8904066 0.0110034301

$Dim.2
$Dim.2$`quanti`
correlation      p.value
P_FORET          0.8677513 1.441902e-19
ER_FAI           0.8673864 1.555632e-19
PRI_ER           0.7890293 4.267097e-14
Fonction         0.7780649 1.607867e-13
ALT              0.6427111 2.345232e-08
PRI_FRAG         0.4688190 1.385009e-04
Pente            0.4325646 4.985151e-04
sols_um....     -0.2867577 2.505208e-02
Cr               -0.5806331 9.327586e-07
ER_EXT           -0.8803301 9.087560e-21
P_EPARS          -0.8878667 1.488537e-21
PRI_OS           -0.8889496 1.135710e-21

$Dim.2$quali
R2      p.value
HER 0.3221738 5.510482e-05

$Dim.2$category
Estimate      p.value
G 3.6375393 0.0018852284
B -0.2179253 0.0373700731
E -2.3299212 0.0007371332

```

### Résultats de la classification

Description of each cluster by the categories

=====

```

$`1`
Cla/Mod Mod/Cla Global      p.value      v.test
HER=E 91.66667      55 19.67213 4.097622e-06 4.606368
HER=B 15.38462      30 63.93443 2.008193e-04 -3.717984

$`2`
Cla/Mod Mod/Cla Global      p.value      v.test
HER=E 8.333333 3.703704 19.67213 0.005063748 -2.80295

$`3`
Cla/Mod Mod/Cla Global      p.value      v.test
HER=B 35.89744      100 63.93443 0.0006700424 3.401553
HER=E 0.00000        0 19.67213 0.0299940483 -2.170169

```

Groupe 1						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
P_EPARS	6,2	0,6	0,3	0,2	0,2	9,0.10-10
ER_EXT	6,1	0,6	0,3	0,2	0,2	1,1.10-9
PRI_OS	5,5	2,7	2,0	0,5	0,7	3,1.10-8
Cr	4,1	17,4	9,7	13,1	10,2	4,1.10-5
ER_FOR	2,3	0,1	0,1	0,1	0,1	2,3.10-2
ALT	-2,4	101,5	144,5	52,0	97,9	1,8.10-2
Fonction	-2,5	1,0	1,3	0,0	0,7	1,1.10-2
Pente	-2,8	22,8	25,1	3,4	4,4	5,0.10-3
area_km2	-2,9	3,4	15,1	6,9	22,2	4,3.10-3
nb_patch_f	-2,9	10,3	52,6	20,4	79,3	3,9.10-3
PRI_ER	-2,9	1,0	1,4	0,0	0,7	3,6.10-3
diversite	-2,9	0,9	1,8	0,9	1,5	3,5.10-3
ptot_foret	-3,1	7749,8	41773,2	13320,8	60095,4	2,2.10-3
atot_foret	-3,1	414312,9	2227385,0	854791,7	3183252,0	2,1.10-3
amax_foret	-3,1	296695,3	1138522,0	653171,8	1458584,0	1,8.10-3
forme	-3,1	160,3	824,3	213,1	1144,5	1,7.10-3
P_FORET	-3,6	0,1	0,2	0,1	0,2	2,7.10-4
ER_MOD	-4,0	0,2	0,3	0,1	0,1	5,5.10-5
P_ARBU	-4,5	0,3	0,4	0,1	0,2	5,7.10-6
ER_FAI	-5,1	0,1	0,3	0,1	0,2	3,9.10-7

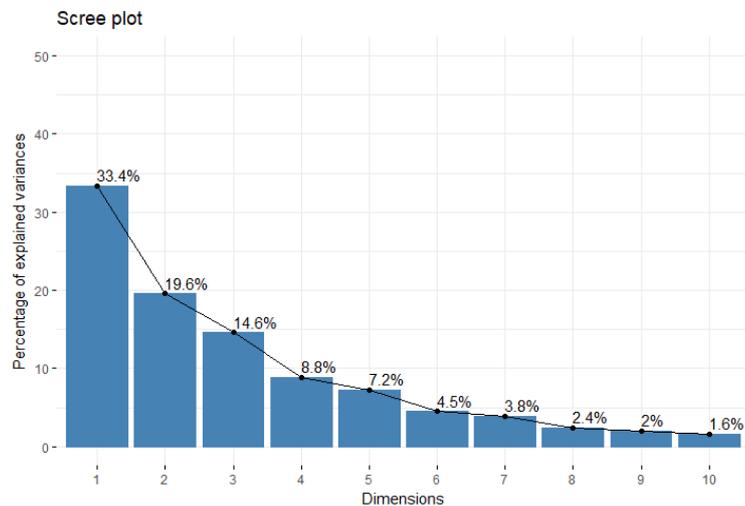
Groupe 2						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
PRI_ER	4,3	1,9	1,4	0,9	0,7	1,48E-05
P_FORET	4,2	0,4	0,2	0,2	0,2	2,23E-05
ALT	4,2	204,3	144,5	112,6	97,9	2,52E-05
ER_FAI	4,1	0,4	0,3	0,2	0,2	3,49E-05
Fonction	4,1	1,7	1,3	0,9	0,7	4,84E-05
PRI_FRAG	3,8	2,6	2,1	0,6	0,9	1,50E-04
ER_MOD	2,4	0,3	0,3	0,1	0,1	1,50E-02
Pente	2,1	26,5	25,1	5,3	4,4	3,40E-02
Turbidite	-2,0	0,7	1,5	1,6	2,8	4,90E-02
amax_foret	-2,5	608320,6	1138522,0	638852,3	1458584,0	1,21E-02
diversite	-2,6	1,2	1,8	1,0	1,5	9,68E-03
Cr	-2,9	5,4	9,7	6,1	10,2	4,15E-03
atot_foret	-3,3	720585,9	2227385,0	649745,9	3183252,0	1,09E-03
forme	-3,4	256,4	824,3	252,0	1144,5	6,14E-04
ptot_foret	-3,4	11818,9	41773,2	9863,7	60095,4	5,80E-04
area_km2	-3,6	3,6	15,1	4,5	22,2	3,37E-04
nb_patch_f	-3,6	11,4	52,6	14,3	79,3	3,33E-04
ER_EXT	-4,7	0,2	0,3	0,1	0,2	2,51E-06
P_EPARS	-4,9	0,2	0,3	0,1	0,2	1,13E-06
PRI_OS	-5,1	1,6	2,0	0,5	0,7	4,37E-07

Groupe 3						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
forme	7,5	2868,2	824,3	301,7	1144,5	4,37E-14
ptot_foret	7,5	148147,2	41773,2	24391,5	60095,4	7,26E-14
nb_patch_f	7,5	192,6	52,6	31,2	79,3	8,45E-14
area_km2	7,4	54,0	15,1	8,2	22,2	1,14E-13
atot_foret	7,3	7723458,0	2227385,0	1735443,0	3183252,0	2,90E-13
amax_foret	6,4	3363662,0	1138522,0	1169318,0	1458584,0	1,12E-10
diversite	6,3	4,0	1,8	0,4	1,5	2,65E-10
P_ARBU	2,9	0,5	0,4	0,0	0,2	3,23E-03
sols_um....	2,1	99,6	95,5	0,5	8,3	3,51E-02
Fonction	-2,0	1,0	1,3	0,0	0,7	4,81E-02
ALT	-2,3	90,5	144,5	32,1	97,9	1,99E-02
PRI_FRAG	-5,2	1,0	2,1	0,0	0,9	2,48E-07

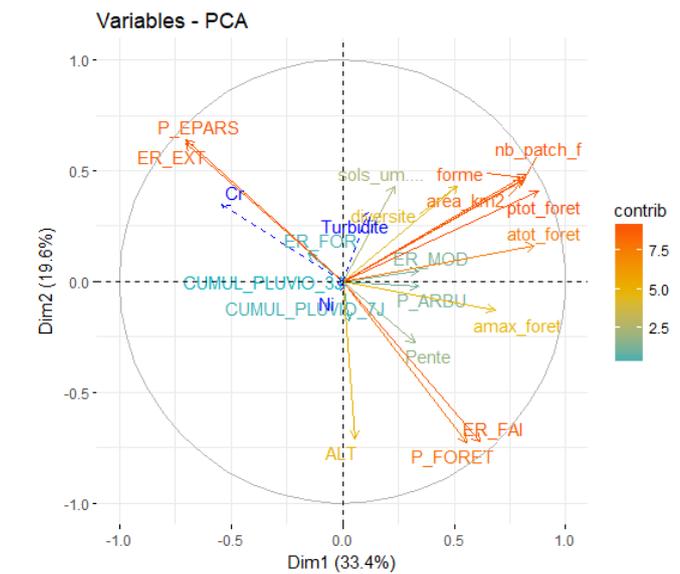
## ANNEXE 8 : RESULTATS DETAILLES DE L'ACP (BASSINS VERSANTS <50KM<sup>2</sup>)

48 observations – 24 variables

### Valeurs propres



### Cercle de corrélation des variables



## Variables caractérisant les dimensions

```

$Dim.2
$Dim.2$`quanti`
      correlation      p.value
PRI_OS      0.7530218 6.652502e-10
P_EPARS     0.6403751 9.501917e-07
ER_EXT      0.6249875 2.050103e-06
nb_patch_f  0.4833215 5.017963e-04
forme       0.4675736 8.056946e-04
area_km2    0.4553305 1.146585e-03
sols_um.... 0.4304663 2.258094e-03
diversite   0.4294126 2.321327e-03
ptot_foret  0.4071215 4.081134e-03
Cr          0.3471808 1.562047e-02
Turbidite   0.3091543 3.250791e-02
PRI_FRAG    -0.5804165 1.530036e-05
PRI_ER      -0.6854358 7.660144e-08
ALT         -0.7088304 1.724001e-08
ER_FAI      -0.7220872 6.931383e-09
P_FORET     -0.7260924 5.209504e-09
Fonction    -0.7517375 7.381815e-10

$Dim.2$quali
      R2      p.value
HER 0.3386807 0.0003650112

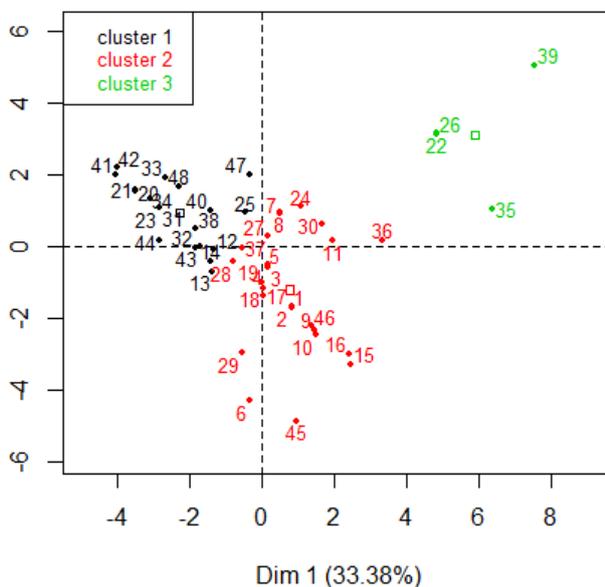
$Dim.2$category
      Estimate      p.value
E 2.10551248 0.001007004
B 0.06322433 0.048916334
G -2.96695563 0.007279430

> dimdesc(Acp, axes = c(1,2), proba = 0.05)
$`Dim.1`
$`Dim.1`$`quanti`
      correlation      p.value
ptot_foret  0.8768599 3.095342e-16
atot_foret  0.8597399 5.100114e-15
nb_patch_f  0.8244395 5.965798e-13
forme       0.8202460 9.784967e-13
area_km2    0.8087389 3.570975e-12
amax_foret  0.6830040 8.874772e-08
ER_FAI      0.6178222 2.892171e-06
P_FORET     0.5576514 3.828568e-05
diversite   0.5151970 1.789567e-04
PRI_ER      0.4101216 3.790952e-03
P_ARBU      0.3423702 1.722053e-02
ER_MOD      0.3387567 1.851193e-02
Fonction    0.3258049 2.383413e-02
Pente       0.3242064 2.457217e-02
PRI_OS      -0.4854481 4.698891e-04
Cr          -0.5400721 7.434769e-05
P_EPARS     -0.7011074 2.865336e-08
ER_EXT      -0.7025097 2.615958e-08

```

## Résultats de la classification – Représentation des individus

**Factor map**



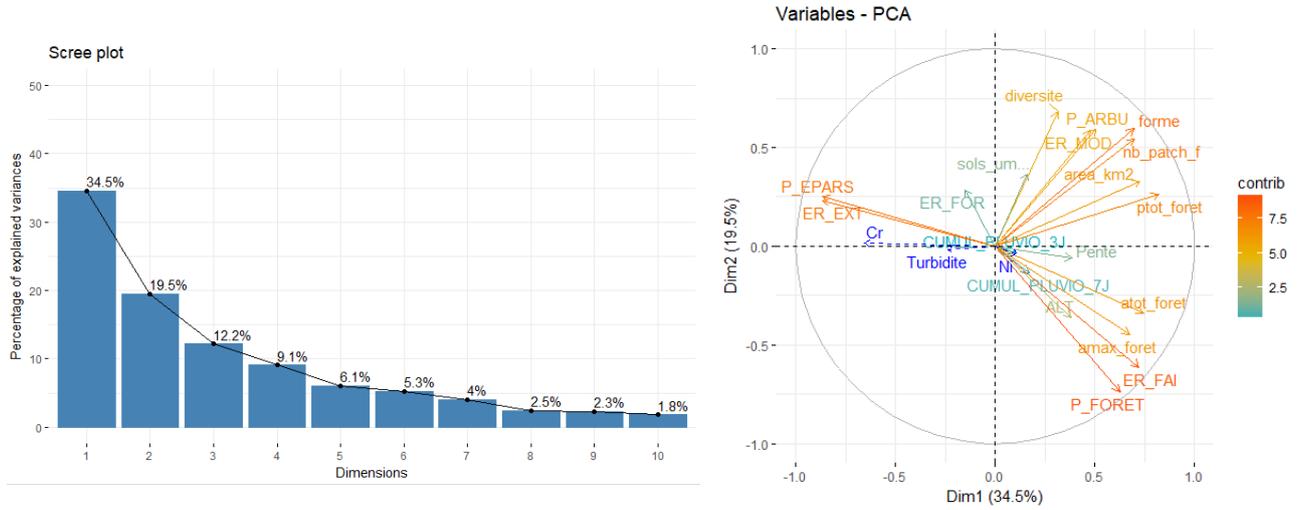
## Caractéristiques des groupes

Groupe 1						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
P_EPARS	5,6	0,6	0,4	0,2	0,3	1,66E-08
ER_EXT	5,5	0,6	0,3	0,2	0,3	4,91E-08
PRI_OS	4,5	2,6	2,0	0,5	0,7	8,39E-06
Cr	4,0	18,4	10,3	13,5	11,4	7,75E-05
ER_MOD	-2,5	0,2	0,3	0,1	0,1	1,33E-02
nb_patch_f	-2,5	3,5	12,3	4,4	19,6	1,23E-02
area_km2	-2,5	1,1	4,0	1,2	6,4	1,18E-02
forme	-2,6	95,1	248,1	111,8	327,1	9,45E-03
Pente	-2,7	22,6	25,0	3,9	4,9	7,27E-03
ptot_foret	-3,0	3363,6	11498,6	4454,7	15041,1	2,69E-03
Fonction	-3,0	1,0	1,4	0,0	0,7	2,57E-03
P_ARBU	-3,0	0,3	0,4	0,1	0,2	2,37E-03
amax_foret	-3,3	78857,2	474943,8	132943,3	656209,3	8,10E-04
PRI_ER	-3,4	1,0	1,5	0,0	0,8	7,67E-04
atot_foret	-3,4	128597,2	648706,8	186370,5	851433,3	6,99E-04
P_FORET	-4,3	0,1	0,3	0,1	0,2	1,89E-05
ER_FAI	-5,1	0,1	0,3	0,1	0,2	4,42E-07
Groupe 2						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
ER_FAI	4,4	0,5	0,3	0,2	0,2	9,14E-06
P_FORET	3,7	0,4	0,3	0,2	0,2	2,49E-04
PRI_ER	3,3	1,8	1,5	0,9	0,8	1,10E-03
Fonction	3,2	1,7	1,4	0,9	0,7	1,47E-03
P_ARBU	3,0	0,5	0,4	0,2	0,2	2,44E-03
ALT	3,0	201,5	157,5	115,7	106,0	2,97E-03
Pente	2,5	26,7	25,0	4,8	4,9	1,40E-02
ER_MOD	2,4	0,3	0,3	0,1	0,1	1,60E-02
PRI_FRAG	2,2	2,6	2,4	0,6	0,8	2,60E-02
Cr	-3,5	4,8	10,3	4,4	11,4	5,23E-04
PRI_OS	-4,7	1,6	2,0	0,5	0,7	2,80E-06
ER_EXT	-4,9	0,2	0,3	0,1	0,3	8,89E-07
P_EPARS	-5,1	0,2	0,4	0,1	0,3	3,25E-07
Groupe 3						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
area_km2	6,6	24,3	4,0	0,5	6,4	4,27E-11
nb_patch_f	6,4	73,5	12,3	4,1	19,6	1,22E-10
ptot_foret	5,8	53442,6	11498,6	14083,2	15041,1	8,20E-09
forme	5,4	1099,5	248,1	440,9	327,1	7,47E-08
atot_foret	5,1	2730084,0	648706,8	635793,0	851433,3	4,35E-07
amax_foret	3,2	1488825,0	474943,8	763686,2	656209,3	1,40E-03
diversite	3,0	2,7	1,1	1,1	1,1	2,43E-03
Turbidite	2,4	4,7	1,5	4,6	2,9	1,83E-02
ALT	-2,0	53,8	157,5	77,2	106,0	4,32E-02
PRI_FRAG	-2,4	1,5	2,4	0,5	0,8	1,81E-02

## ANNEXE 9 : RESULTATS DETAILLES DE L'ACP (BASSINS VERSANTS DE MOINS DE 20KM<sup>2</sup>)

44 observations de 24 variables

### Valeurs propres / Cercle de corrélation des variables



### Variables caractérisant les dimensions

```

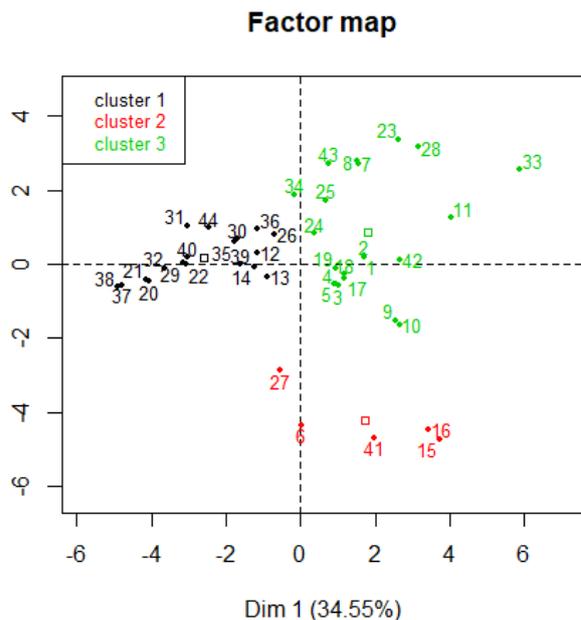
$`Dim.1`
$`Dim.1`$`quanti`
correlation      p.value
ptot_foret      0.8209813 8.831249e-12
atot_foret      0.7445003 6.895037e-09
area_km2        0.7260499 2.440756e-08
ER_FAI          0.7206282 3.471858e-08
nb_patch_f      0.6993263 1.285528e-07
forme           0.6970972 1.464691e-07
amax_foret      0.6761730 4.719506e-07
P_FORET         0.6262355 5.447739e-06
PRI_ER         0.5452373 1.296050e-04
P_ARBU          0.5049239 4.733059e-04
ER_MOD         0.4804652 9.637413e-04
Fonction       0.4698837 1.290141e-03
Pente          0.3846905 9.927228e-03
ALT            0.3822619 1.044577e-02
PRI_FRAG       0.3508427 1.954363e-02
diversite      0.3149630 3.730492e-02
Cr             -0.6590912 1.146601e-06
PRI_OS        -0.7497299 4.725134e-09
ER_EXT        -0.8649728 3.719069e-14
P_EPARS       -0.8657892 3.301636e-14

$`Dim.1`$`quali`
R2      p.value
HER 0.2419085 0.01063351

$`Dim.1`$`category`
Estimate p.value
B 0.8030691 0.01012057
E -1.8200886 0.01476604

$Dim.2
$Dim.2$`quanti`
correlation      p.value
diversite        0.6804958 3.735043e-07
forme            0.5942805 2.107564e-05
P_ARBU           0.5928291 2.233511e-05
ER_MOD           0.5857407 2.953707e-05
nb_patch_f       0.5436413 1.368559e-04
PRI_OS           0.4041652 6.510285e-03
sols_um...       0.3675897 1.409867e-02
area_km2         0.3272576 3.012911e-02
PRI_FRAG         -0.3338079 2.679893e-02
atot_foret       -0.3378135 2.491775e-02
ALT              -0.3599463 1.639811e-02
amax_foret       -0.4458439 2.420467e-03
PRI_ER           -0.5844842 3.101609e-05
ER_FAI           -0.6111901 1.049193e-05
Fonction         -0.7169044 4.401843e-08
P_FORET          -0.7372492 1.147369e-08
    
```

## Résultats de la classification



Groupe 1						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
P_EPARS	5,0	0,6	0,4	0,2	0,3	6,45E-07
ER_EXT	4,9	0,6	0,4	0,2	0,3	1,16E-06
PRI_OS	4,4	2,6	2,0	0,5	0,7	8,89E-06
Cr	3,9	19,0	10,7	13,5	11,6	9,27E-05
diversite	-2,1	0,6	1,0	0,7	1,0	3,28E-02
Pente	-2,2	23,0	24,9	4,0	4,9	2,71E-02
P_ARBU	-2,4	0,3	0,4	0,2	0,2	1,76E-02
ALT	-2,6	117,0	166,9	62,9	103,2	8,30E-03
Fonction	-3,0	1,0	1,4	0,0	0,7	2,86E-03
amax_foret	-3,3	43227,6	382772,7	56270,3	561062,7	9,60E-04
PRI_ER	-3,3	1,0	1,5	0,0	0,8	8,82E-04
forme	-3,5	65,0	170,7	75,8	164,9	4,66E-04
nb_patch_f	-3,6	2,2	6,8	2,0	7,0	3,54E-04
atot_foret	-3,7	70199,8	459490,7	93306,7	569614,8	1,92E-04
P_FORET	-4,0	0,1	0,2	0,1	0,2	6,36E-05
ptot_foret	-4,2	2026,0	7685,5	2537,2	7368,4	2,78E-05
area_km2	-4,3	0,7	2,1	0,6	1,8	1,51E-05
ER_FAI	-4,7	0,1	0,3	0,1	0,3	2,24E-06

Groupe 2						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
P_FORET	5,33	0,79	0,24	0,06	0,24	9,83E-08
Fonction	4,99	3,00	1,41	0,00	0,75	5,98E-07
ER_FAI	4,71	0,80	0,30	0,06	0,25	2,53E-06
PRI_ER	4,57	3,00	1,48	0,00	0,78	4,97E-06
amax_foret	3,15	1136137,00	382772,70	1002887,00	561062,70	1,62E-03
atot_foret	2,80	1138395,00	459490,70	1005435,00	569614,80	5,14E-03
sols_um....	-2,36	84,58	93,89	13,94	9,26	1,81E-02
diversite	-2,38	0,02	1,00	0,01	0,97	1,72E-02
P_ARBU	-2,52	0,18	0,38	0,06	0,18	1,17E-02
ER_MOD	-2,54	0,13	0,26	0,02	0,13	1,12E-02
ER_EXT	-2,91	0,02	0,35	0,03	0,27	3,65E-03
P_EPARS	-2,96	0,02	0,38	0,03	0,28	3,10E-03
PRI_OS	-3,32	1,00	2,02	0,00	0,72	8,91E-04

Groupe 3						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
area_km2	4,86	3,51	2,10	1,55	1,82	1,16E-06
forme	4,57	290,90	170,75	155,33	164,91	4,99E-06
ptot_foret	4,38	12834,52	7685,54	7062,98	7368,45	1,20E-05
nb_patch_f	4,11	11,33	6,77	7,41	6,95	3,94E-05
P_ARBU	3,94	0,49	0,38	0,13	0,18	8,23E-05
diversite	3,61	1,56	1,00	0,93	0,97	3,01E-04
ER_MOD	3,29	0,33	0,26	0,08	0,13	1,01E-03
sols_um....	2,61	97,74	93,89	4,35	9,26	9,15E-03
Pente	2,34	26,75	24,93	5,33	4,86	1,92E-02
PRI_OS	-2,26	1,76	2,02	0,53	0,72	2,37E-02
ER_EXT	-2,94	0,23	0,35	0,13	0,27	3,29E-03
P_EPARS	-3,02	0,24	0,38	0,14	0,28	2,53E-03
Cr	-3,30	4,54	10,66	4,58	11,61	9,58E-04

**ANNEXE 10 : RESULTATS DETAILLES DE L'ANALYSE SUR LA BASE DE DONNEES**  
**« PLUVIOMETRIE »**

***Matrice des corrélations de Kendall***

Script utilisé

cor.test(X, Y, method="kendall", use="complete.obs")

	Turbidite	CUMUL_PLUVIO7j	ER_FAI	ER_EXT	P_EPARS P	P_FORET
Turbidité	1	-0,01	-0,23	0,23	0,23	-0,27**
Ni	0,32**	0,24*	-0,01	0,03	0,03	-0,08
Cr	0,29**	0,29*	-0,42**	0,34**	0,34**	-0,44**
	amax_foret	atot_foret	ptot_foret	ALT	Pente	
Turbidité	-0,12	-0,09	-0,02	-0,30**	-0,21	
Ni	-0,03	-0,02	0,03	-0,13	-0,37**	
Cr	-0,26*	-0,27*	-0,22*	-0,54**	-0,42**	

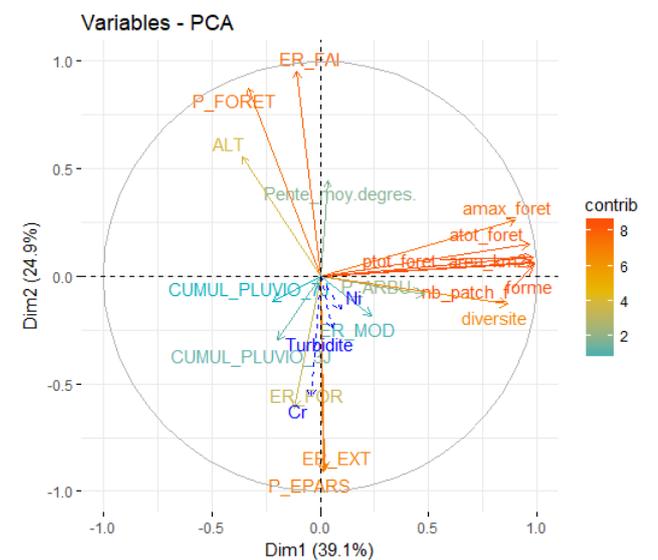
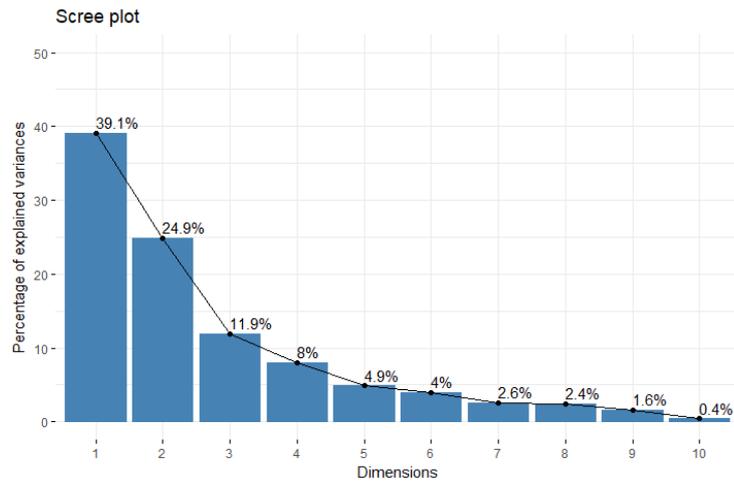
***Comparaison de moyennes (42 observations)***

Facteurs influençant le Chrome	p-value	classes différentes
CLASSES_CUMUL_7J	1,8.10-3	<200 et >200
CLASSES_ER_EXT	1,7.10-2	<20 et >35 // 20-35 et >35
CLASSES_P_EPARS	4,0.10-3	<25 et >40 / 25-40 et >40
CLASSES_P_FORET	1,1.10-4	<10 et >25 // 10-25 et >25
PRI_OS	2,0.10-2	1 et 3
CLASSES_PENTE	1,7.10-3	<20 et >30 // <20 et 20-30
CLASSES_ALT	1,8.10-4	<100->150 // <100-100-150
HER	4,2.10-5	B et D// B et E // D et G
Facteurs influençant le Nickel	p-value	classes différentes
CLASSES_PENTE	1,9.10-2	<25 et >25
Facteurs influençant la turbidité	p-value	classes différentes
CLASSES_ALT	4,3.10-3	<150 et >150

## ANNEXE 11 : ACP BASE DE DONNEES « PLUVIOMETRIE » ( TOUS BASSINS VERSANTS)

37 observations, 26 variables (17 actives, 3 quanti sup, 4 quali sup)

### Valeurs propres / Cercle de corrélation des variables

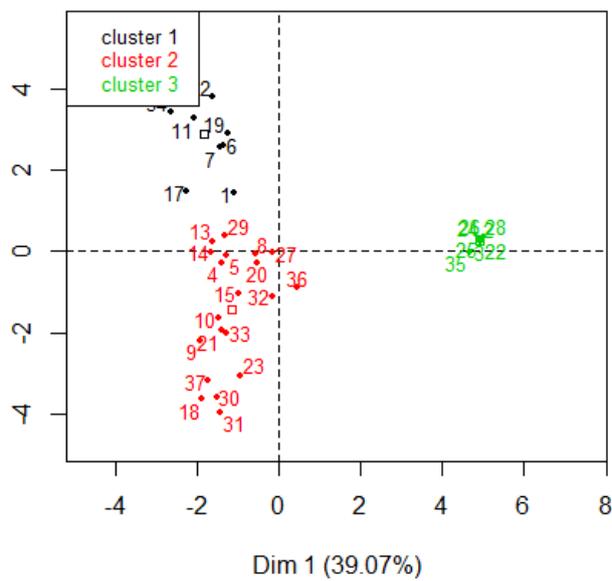


## Variables caractérisant les dimensions

\$`Dim.1`			\$Dim.2		
\$`Dim.1`\$`quanti`			\$Dim.2\$`quanti`		
	correlation	p.value		correlation	p.value
forme	0.9899905	2.333814e-31	ER_FAI	0.9548473	4.979439e-20
nb_patch_f	0.9878649	6.673764e-30	P_FORET	0.8767533	1.131495e-12
ptot_foret	0.9849101	2.954902e-28	Fonction	0.7755247	1.731413e-08
area_km2	0.9838811	9.297219e-28	PRI_ER	0.7689380	2.712359e-08
atot_foret	0.9663801	3.129235e-22	ALT	0.5586459	3.262578e-04
amax_foret	0.9018737	2.575886e-14	Pente_moy. degres.	0.4477811	5.451398e-03
diversite	0.8642241	5.551319e-12	Cr	-0.5655246	2.648833e-04
P_ARBU	0.4818917	2.527555e-03	ER_FOR	-0.6123528	5.625662e-05
P_FORET	-0.3336975	4.354929e-02	PRI_OS	-0.9003106	3.353489e-14
ALT	-0.3614820	2.792948e-02	ER_EXT	-0.9029725	2.134199e-14
Fonction	-0.3937740	1.589364e-02	P_EPARS	-0.9104904	5.532113e-15
PRI_ER	-0.3963376	1.516284e-02			
PRI_FRAG	-0.8340899	1.439550e-10			
			\$Dim.2\$quali		
			R2	p.value	
			HER	0.5143815	2.299714e-05
			\$Dim.2\$category		
			Estimate	p.value	
			G	3.5540783	0.008924617
			B	0.5179254	0.011524436
			E	-2.5888003	0.001780118

## Résultats de la classification

**Factor map**



Groupe 1 (9 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
Fonction	5,8	2,8	1,4	0,4	0,8	6,86E-09
PRI_ER	5,7	2,9	1,5	0,3	0,8	1,48E-08
P_FORET	5,1	0,6	0,3	0,2	0,2	4,02E-07
ER_FAI	4,8	0,7	0,4	0,1	0,2	2,02E-06
ALT	3,4	264,5	157,7	138,6	107,8	7,56E-04
Pente.	2,7	27,9	24,4	4,3	4,4	6,24E-03
PRI_FRAG	2,3	2,9	2,3	0,3	0,9	2,01E-02
forme	-2,0	120,7	788,1	87,0	1150,9	4,85E-02
Cr	-2,1	4,7	8,4	3,8	6,1	3,74E-02
ER_MOD	-2,2	0,2	0,3	0,1	0,1	3,15E-02
P_ARBU	-2,2	0,3	0,4	0,2	0,2	2,83E-02
diversite	-2,6	0,5	1,7	0,8	1,5	8,14E-03
P_EPARS	-4,0	0,0	0,3	0,0	0,2	6,30E-05
ER_EXT	-4,0	0,0	0,3	0,0	0,2	5,43E-05
PRI_OS	-4,9	1,0	1,9	0,0	0,6	7,43E-07

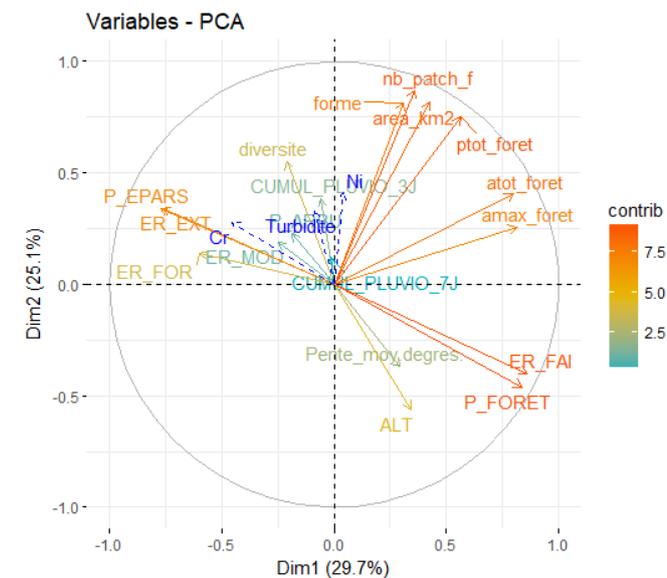
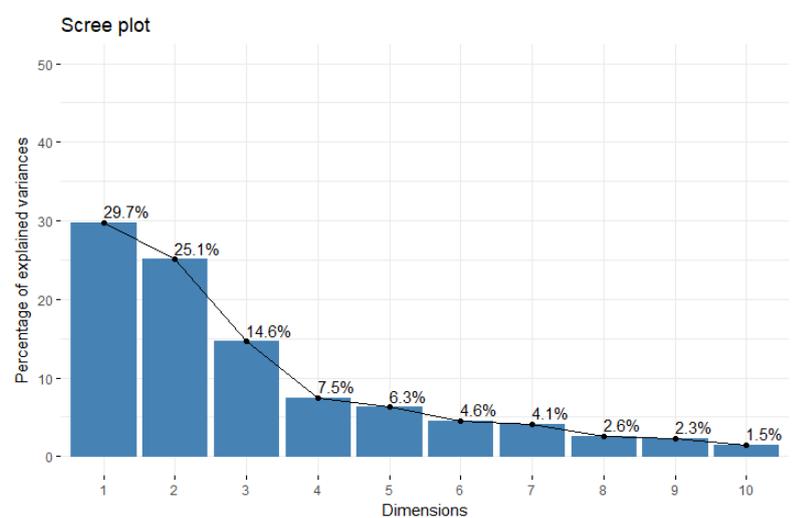
Groupe 2 (19 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
PRI_OS	3,9	2,3	1,9	0,5	0,6	8,60E-05
P_EPARS	3,5	0,4	0,3	0,2	0,2	4,95E-04
ER_EXT	3,5	0,4	0,3	0,2	0,2	5,14E-04
ER_FOR	2,3	0,1	0,1	0,0	0,0	2,42E-02
Cr	2,2	10,5	8,4	7,1	6,1	2,66E-02
CUMUL_PLUVIO_3J	2,0	152,5	113,0	142,0	130,8	4,97E-02
Pente_moy.degres.	-2,8	22,5	24,4	4,2	4,4	4,98E-03
P_FORET	-3,2	0,2	0,3	0,1	0,2	1,39E-03
forme	-3,2	220,2	788,1	199,4	1150,9	1,32E-03
area_km2	-3,2	3,7	14,7	5,0	22,4	1,32E-03
nb_patch_f	-3,2	11,4	51,0	15,2	79,6	1,19E-03
PRI_ER	-3,3	1,1	1,5	0,3	0,8	1,12E-03
ptot_foret	-3,3	10071,1	41622,9	10849,6	61660,5	8,68E-04
Fonction	-3,6	1,0	1,4	0,0	0,8	3,66E-04
atot_foret	-3,6	512806,7	2321981,0	667827,1	3276310,0	3,26E-04
amax_foret	-3,8	389897,5	1255079,0	549790,8	1490150,0	1,58E-04
ER_FAI	-3,9	0,2	0,4	0,2	0,2	9,04E-05

Groupe 3 (8 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
ptot_foret	5,9	157944,6	41622,9	0,0	61660,5	2,76E-09
forme	5,9	2958,6	788,1	0,0	1150,9	2,80E-09
nb_patch_f	5,9	201,0	51,0	0,0	79,6	2,92E-09
area_km2	5,9	56,7	14,7	0,0	22,4	3,39E-09
atot_foret	5,9	8431849,0	2321981,0	0,0	3276310,0	4,18E-09
amax_foret	5,5	3840941,0	1255079,0	0,0	1490150,0	4,54E-08
diversite	4,8	3,9	1,7	0,0	1,5	1,31E-06
P_ARBU	2,2	0,5	0,4	0,0	0,2	3,04E-02
PRI_FRAG	-4,7	1,0	2,3	0,0	0,9	2,33E-06

## ANNEXE 12 : ACP BASE DE DONNEES « PLUVIOMETRIE » (BASSINS VERSANTS <50KM2)

29 observations - 26 variables (17 actives, 3 quanti sup, 4 quali sup)

### Valeurs propres / Cercle de corrélation des variables



## Variables caractérisant les dimensions

```

$`Dim.1`
$`Dim.1`$`quanti`
      correlation      p.value
ER_FAI      0.8615969 1.953431e-09
P_FORET     0.8373124 1.489101e-08
amax_foret  0.8133044 8.208705e-08
atot_foret  0.7967821 2.321799e-07
PRI_ER      0.6690055 7.254902e-05
Fonction    0.6687828 7.310025e-05
ptot_foret  0.5660020 1.372758e-03
area_km2    0.4255129 2.137604e-02
Cr          -0.4528827 1.362457e-02
ER_FOR      -0.5980404 6.117760e-04
PRI_OS      -0.6556087 1.131438e-04
ER_EXT      -0.7633787 1.461243e-06
P_EPARS     -0.7736984 8.556027e-07

$`Dim.1`$quali
      R2      p.value
HER 0.3090371 0.02422138

$`Dim.1`$category
      Estimate      p.value
B  0.7663254 0.03992936
D -1.8294143 0.02763768

$Dim.2
$Dim.2$`quanti`
      correlation      p.value
nb_patch_f      0.8708820 8.101602e-10
area_km2        0.8176638 6.133815e-08
forme           0.8145818 7.542851e-08
ptot_foret     0.7512489 2.651905e-06
PRI_OS         0.6133218 4.034923e-04
diversite      0.5486871 2.055870e-03
Ni             0.4097056 2.730020e-02
atot_foret     0.4041284 2.968458e-02
CUMUL_PLUVIO_3J 0.3840621 3.969553e-02
Pente_moy.degrees. -0.3706885 4.775113e-02
ER_FAI        -0.3996918 3.169956e-02
PRI_FRAG      -0.4289710 2.023233e-02
P_FORET       -0.4612854 1.177982e-02
PRI_ER        -0.4939780 6.459285e-03
ALT           -0.5617926 1.517433e-03
Fonction      -0.5800786 9.723061e-04

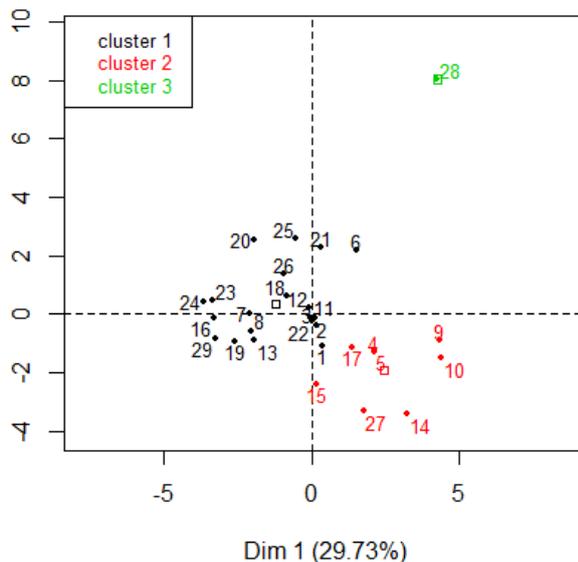
$Dim.2$quali
      R2      p.value
HER 0.4047835 0.004194455

$Dim.2$category
      Estimate      p.value
E  2.645924 0.0006432341

```

## Résultats de la classification

**Factor map**



Groupe 1 (21 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
PRI_OS	3,4	2,2	1,9	0,5	0,7	7,70E-04
P_EPARS	3,2	0,4	0,3	0,2	0,2	1,45E-03
ER_EXT	3,2	0,4	0,3	0,2	0,2	1,47E-03
P_ARBU	2,4	0,4	0,4	0,2	0,2	1,73E-02
ER_FOR	2,3	0,1	0,1	0,0	0,0	2,08E-02
ER_MOD	2,3	0,3	0,3	0,1	0,1	2,27E-02
atot_foret	-2,6	387585,0	636499,9	375017,0	745957,5	8,48E-03
amax_foret	-2,8	294056,1	541737,6	355492,9	692569,4	4,79E-03
ER_FAI	-4,1	0,2	0,4	0,2	0,3	3,58E-05
P_FORET	-4,5	0,2	0,3	0,1	0,3	7,64E-06
PRI_ER	-4,5	1,2	1,7	0,4	0,9	6,22E-06
Fonction	-4,6	1,1	1,6	0,2	0,9	3,62E-06

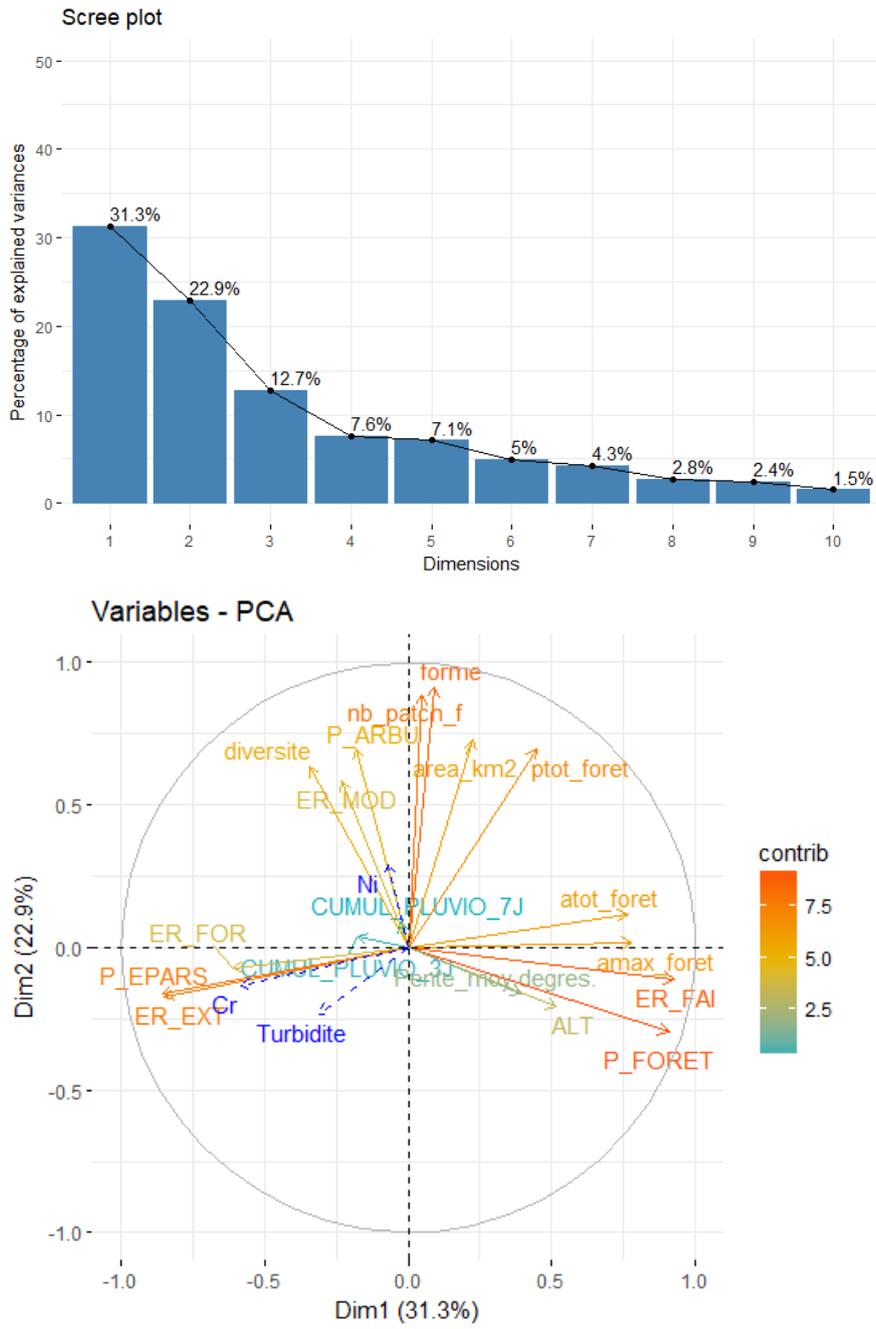
Groupe 2 (21 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
Fonction	5,06	2,88	1,55	0,33	0,85	4,24E-07
PRI_ER	4,98	3,00	1,66	0,00	0,88	6,34E-07
P_FORET	4,65	0,69	0,32	0,14	0,26	3,35E-06
ER_FAI	4,32	0,72	0,38	0,12	0,25	1,59E-05
ALT	2,36	257,56	172,64	145,51	117,52	1,83E-02
Pente_moy.d	2,29	27,62	24,17	4,47	4,93	2,22E-02
diversite	-2,09	0,42	1,04	0,80	0,97	3,62E-02
ER_MOD	-2,11	0,20	0,27	0,09	0,12	3,50E-02
P_ARBU	-2,23	0,27	0,38	0,12	0,16	2,55E-02
ER_FOR	-2,26	0,05	0,08	0,04	0,04	2,41E-02
P_EPARS	-3,47	0,04	0,29	0,03	0,24	5,11E-04
ER_EXT	-3,50	0,04	0,27	0,03	0,22	4,71E-04
PRI_OS	-4,11	1,00	1,90	0,00	0,71	3,89E-05

Groupe 3 (1 individu)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
area_km2	4,8	23,9	3,2	0,0	4,3	1,73E-06
nb_patch_f	4,6	70,0	9,6	0,0	13,1	4,05E-06
ptot_foret	3,8	45596,5	9534,2	0,0	9409,8	1,27E-04
atot_foret	3,1	2921671,5	636499,9	0,0	745957,5	2,19E-03
forme	2,9	711,6	189,3	0,0	178,6	3,45E-03
Turbidite	2,6	10,4	1,9	0,0	3,3	1,07E-02
amax_foret	2,4	2218025,4	541737,6	0,0	692569,4	1,55E-02

### ANNEXE 13: ACP BASE DE DONNEES « PLUVIOMETRIE » (BASSINS VERSANTS <20KM2)

28 observations - 26 variables (17 actives, 3 quanti sup, 4 quali sup)

#### Valeurs propres / Cercle de corrélation des variables



## Variables caractérisant les dimensions

```

$`Dim.1`
$`Dim.1`$`quanti`
correlation      p.value
ER_FAI           0.9276265 1.259665e-12
P_FORET          0.9089947 2.222472e-11
Fonction         0.7872459 6.697306e-07
PRI_ER           0.7802969 9.745564e-07
amax_foret       0.7791124 1.037521e-06
atot_foret       0.7656373 2.061352e-06
ALT              0.5167091 4.873827e-03
ptot_foret       0.4464479 1.724268e-02
Pente_moy. degres. 0.3933762 3.836025e-02
Cr               -0.5803057 1.207011e-03
ER_FOR           -0.6124044 5.325288e-04
ER_EXT           -0.8514452 9.259318e-09
P_EPARS          -0.8581410 5.290364e-09
PRI_OS           -0.8626714 3.563753e-09

```

```

$`Dim.1`$quali
R2      p.value
HER 0.4913824 0.0008791291

```

```

$`Dim.1`$category
Estimate  p.value
B  1.143751 0.006592761
D -1.670893 0.037438754
E -2.220605 0.023425182

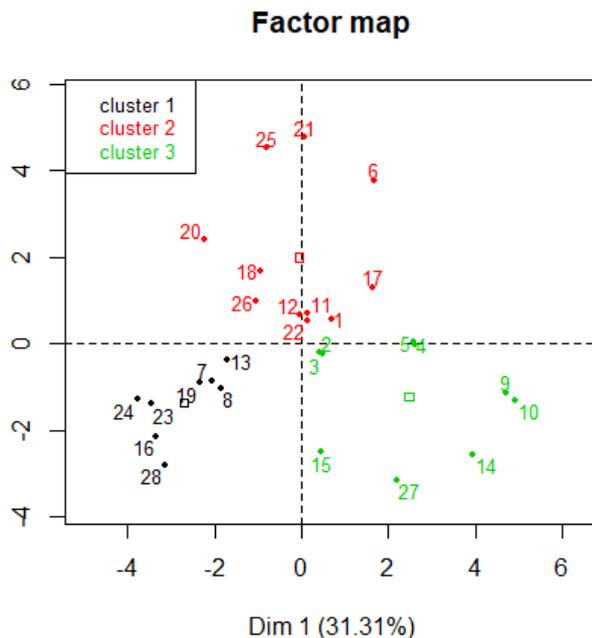
```

```

$Dim.2
$Dim.2$`quanti`
correlation      p.value
forme            0.9116151 1.543435e-11
nb_patch_f       0.8857502 3.734365e-10
area_km2         0.7290943 1.078904e-05
ptot_foret       0.6978267 3.658983e-05
P_ARBU           0.6956571 3.960180e-05
diversite        0.6348315 2.847835e-04
ER_MOD           0.5840814 1.101046e-03
Fonction         -0.3960386 3.695446e-02

```

## Résultats de la classification



Groupe 1 (7 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
P_EPARS	3,6	0,6	0,3	0,2	0,2	0,000354457
ER_EXT	3,6	0,5	0,3	0,2	0,2	0,000367292
Cr	3,2	15,0	8,4	6,2	6,7	0,001264557
PRI_OS	3,1	2,5	1,9	0,5	0,7	0,002283569
ER_FOR	2,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,018650541
Fonction	-2,2	1,0	1,6	0,0	0,9	0,029567796
nb_patch_f	-2,2	3,0	7,5	1,9	6,5	0,025080942
amax_foret	-2,3	38397,5	481870,2	46191,0	626772,5	0,020058823
PRI_ER	-2,5	1,0	1,7	0,0	0,9	0,012083704
forme	-2,6	53,1	170,7	33,2	151,5	0,010757603
atot_foret	-2,6	65645,5	554886,6	81662,2	619003,1	0,009392732
P_FORET	-3,0	0,1	0,3	0,1	0,3	0,002554426
area_km2	-3,0	0,7	2,4	0,5	1,9	0,002439312
ptot_foret	-3,3	1666,8	8246,3	1513,5	6603,2	0,001058354
ER_FAI	-3,7	0,1	0,4	0,1	0,3	0,000217424

Groupe 2 (11 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
nb_patch_f	3,9	13,5	7,5	6,3	6,5	0,0001
area_km2	3,7	4,1	2,4	1,6	1,9	0,0002
forme	3,7	305,1	170,7	147,2	151,5	0,0002
diversite	3,5	1,8	1,0	0,8	1,0	0,0004
Ni	2,7	17,1	12,9	2,7	6,5	0,0075
P_ARBU	2,6	0,5	0,4	0,1	0,2	0,0086
ptot_foret	2,3	11908,3	8246,3	6665,4	6603,2	0,0204

Groupe 3 (9 individus)						
Variables	v.test	Moy groupe	Moy totale	sd groupe	sd total	p-value
Fonction	4,1	2,6	1,6	0,8	0,9	4,55E-05
P_FORET	4,0	0,6	0,3	0,2	0,3	5,34E-05
ER_FAI	3,6	0,6	0,4	0,2	0,3	3,35E-04
PRI_ER	3,5	2,6	1,7	0,8	0,9	4,16E-04
amax_foret	3,1	1032563,0	481870,2	756774,5	626772,5	1,68E-03
atot_foret	2,9	1064080,0	554886,6	754197,5	619003,1	3,26E-03
Pente_moy.d	2,1	27,2	24,3	4,0	5,0	3,42E-02
ER_MOD	-2,2	0,2	0,3	0,1	0,1	2,58E-02
P_ARBU	-2,3	0,3	0,4	0,1	0,2	2,04E-02
Ni	-2,5	8,4	12,9	7,5	6,5	1,30E-02
ER_EXT	-2,7	0,1	0,3	0,1	0,2	6,24E-03
P_EPARS	-2,8	0,1	0,3	0,1	0,2	5,51E-03
diversite	-3,0	0,2	1,0	0,2	1,0	2,52E-03
PRI_OS	-3,3	1,2	1,9	0,4	0,7	1,04E-03

## ANNEXE 14 : TEST DU KHI 2 SUR LA BASE DE DONNEES « PSSE »

### Test d'indépendance de Khi 2 (appliqué sur des tableaux de contingence)

Permet de contrôler l'indépendance de deux variables qualitatives ou entre une variable qualitative et une variable quantitative. Il va permettre de dire si la répartition des effectifs est due au hasard ou à la dépendance des variables. Les effectifs sont représentés dans un tableau de contingence des 2 variables.

Conditions d'application : l'effectif total du tableau doit être supérieur ou égal à 60, l'effectif marginal toujours supérieur à 5, et l'effectif théorique des cases du tableau de contingence doit être supérieur à 5. Des regroupements ont donc été effectués dans les modalités des différentes variables.

Une p-value supérieure à 5% signifie une indépendance entre les 2 variables.

Les effectifs ne respectant pas les conditions d'application du test, l'indépendance entre la fréquence d'occurrence de la turbidité et du manque d'eau n'a pas pu être testée.

### Lien entre Risque d'occurrence de turbidité (1 à 5) et Aléa érosif (PRI\_ER, 1 à 3)

		PRI_ER	
		1	2-3
Risque d'occurrence turbidité	0-1	16	10
	2-3	10	5
	4-5	23	18

```
> chisq.test(matrix(c(16,10,23,10,5,18), nc = 3))
Pearson's Chi-squared test
data: matrix(c(16, 10, 23, 10, 5, 18), nc = 3)
X-squared = 13.487, df = 2, p-value = 0.001179
```

### Lien entre Risque d'occurrence de turbidité (1 à 5) et Tendance paysagère (PRI\_OS, 1 à 3)

		PRI_OS		
		1	2	3
Risque d'occurrence turbidité	0-1-2	8	14	8
	3-4-5	17	26	9

```
> chisq.test(matrix(c(8,17,14,26,8,9), nc = 2))
Pearson's Chi-squared test
data: matrix(c(8, 17, 14, 26, 8, 9), nc = 2)
X-squared = 13.694, df = 2, p-value = 0.001063
```

### Lien entre Risque d'occurrence de turbidité (1 à 5) et Fragmentation (PRI\_FRAG, 1 à 3)

		PRI_FRAG		
		1	2	3
Risque d'occurrence turbidité	0-1-2	14	5	11
	3-4-5	5	7	40

```
> chisq.test(matrix(c(14,5,5,7,11,40), nc = 2))
Pearson's Chi-squared test
data: matrix(c(14, 5, 5, 7, 11, 40), nc = 2)
X-squared = 21.384, df = 2, p-value = 2.272e-05
```

Lien entre Risque d'occurrence de turbidité (1 à 5) et Fonctionnalité (1 à 3)

		Fonction	
		1	2-3
Risque d'occurrence turbidité	0-1-2	21	8
	3-4-5	35	17

```
> chisq.test(matrix(c(21,35,8,17), nc = 2))
Pearson's Chi-squared test with Yates' continuity correction
data: matrix(c(21, 35, 8, 17), nc = 2)
X-squared = 0.051114, df = 1, p-value = 0.8211
```

Lien entre Risque d'occurrence de manque d'eau (1 à 5) et Aléa érosif (PRI\_ER, 1 à 3)

		PRI_ER	
		1	2-3
Risque d'occurrence manque	0-1-2	36	27
	3-4-5	8	6

```
> chisq.test(matrix(c(36,8,27,6), nc = 2))
Pearson's Chi-squared test
data: matrix(c(36, 8, 27, 6), nc = 2)
X-squared = 0, df = 1, p-value = 1
```

Lien entre Risque d'occurrence de manque d'eau (1 à 5) et Tendance paysagère (PRI\_OS, 1 à 3)

		PRI_OS		
		1	2	3
Risque d'occurrence manque	0-1-2	20	31	12
	3-4-5	5	9	5

```
> chisq.test(matrix(c(20,5,31,9,12,5), nc = 2))
Pearson's Chi-squared test
data: matrix(c(20, 5, 31, 9, 12, 5), nc = 2)
X-squared = 17.153, df = 2, p-value = 0.0001885
```

Faute d'effectifs, le test de dépendance entre le risque d'occurrence de manque d'eau et la fragmentation n'a pas pu être effectué.

Lien entre Risque d'occurrence de manque d'eau (1 à 5) et Fonctionnalité (1 à 3)

		Fonction	
		1	2-3
Risque d'occurrence manque	0-1-2	42	20
	3-4-5	14	5

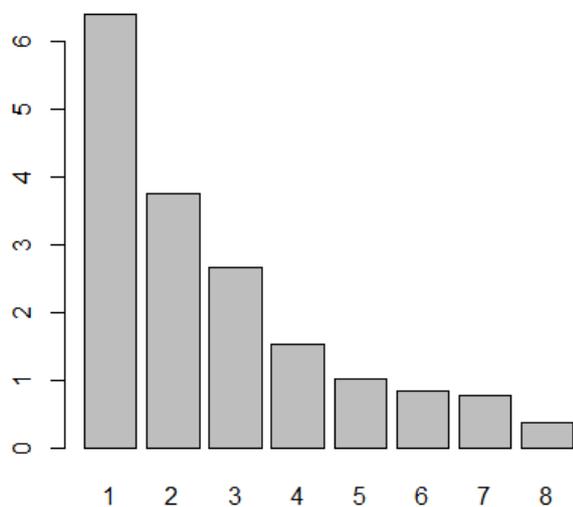
```
> chisq.test(matrix(c(42,14,20,5), nc = 2))
Pearson's Chi-squared test with Yates' continuity correction
data: matrix(c(42, 14, 20, 5), nc = 2)
X-squared = 0.042742, df = 1, p-value = 0.8362
```

## ANNEXE 15 : ACP SUR LA BASE DE DONNEES « PSSE » (BASSINS VERSANT <10KM<sup>2</sup>)

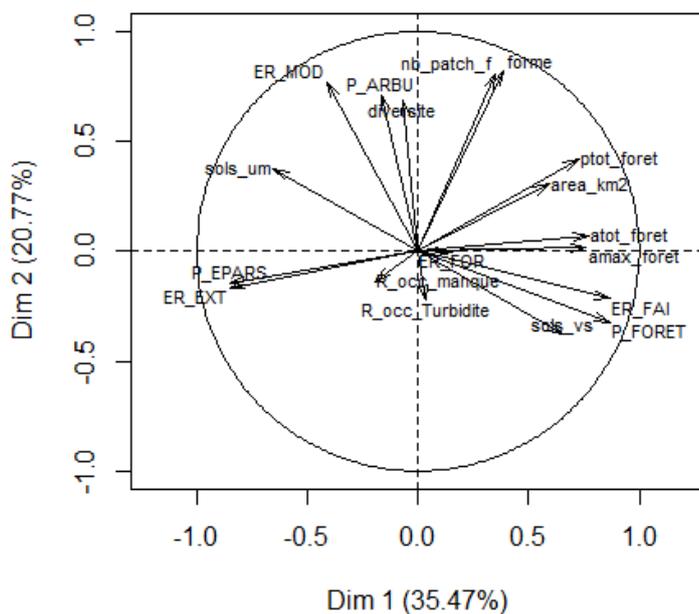
70 observations de 23 variables.

### Valeurs propres / Cercle de corrélation des variables (sans package Factoextra)

**valeurs propres**

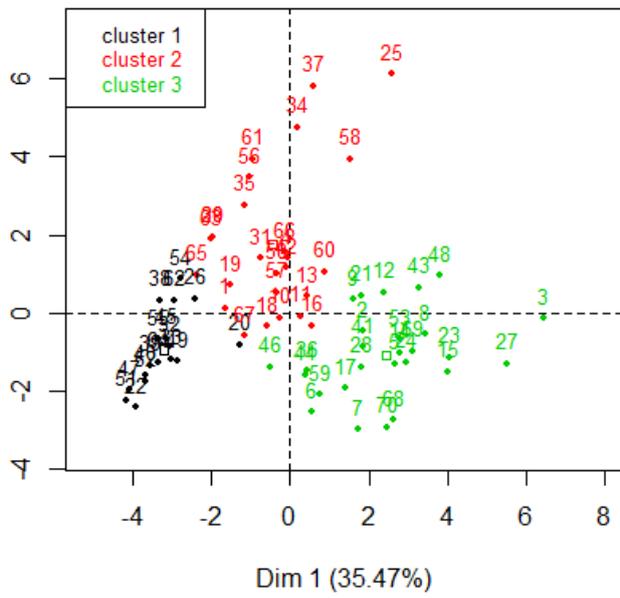


**Cercle des corrélations**



Résultats de la classification

**Factor map**



GROUPE 1

	v.test	Moy groupe	Moy générale	sd groupe	sd général	p-value
P_EPARS	6.776776	6.744545e-01	3.023992e-01	1.668623e-01	2.582828e-01	1.228874e-11
ER_EXT	6.744976	6.341914e-01	2.846699e-01	1.760708e-01	2.437836e-01	1.530527e-11
PRI_OS	5.287889	2.647059e+00	1.857143e+00	4.778846e-01	7.027642e-01	1.237361e-07
sols_um	4.204507	9.822370e-01	5.799070e-01	3.310339e-02	4.501719e-01	2.616520e-05
P_ARBU	-2.086709	2.940092e-01	3.749666e-01	1.395448e-01	1.825180e-01	3.691446e-02
ER_FOR	-2.424233	9.165575e-02	1.524403e-01	5.702257e-02	1.179587e-01	1.534076e-02
amax_foret	-2.801559	3.854683e+04	5.927112e+05	8.711707e+04	9.305718e+05	5.085637e-03
diversite	-2.815373	2.057401e-01	7.449599e-01	5.830198e-01	9.010338e-01	4.872072e-03
atot_foret	-3.037932	4.068649e+04	6.488087e+05	8.783830e+04	9.417247e+05	2.382079e-03
PRI_FRAG	-3.114748	2.117647e+00	2.585714e+00	9.629827e-01	7.069625e-01	1.841020e-03
Fonction	-3.250082	1.000000e+00	1.600000e+00	0.000000e+00	8.684962e-01	1.153715e-03
area_km2	-3.471956	8.694118e-01	2.397286e+00	9.257269e-01	2.070257e+00	5.166802e-04
nb_patch_f	-3.605851	1.176471e+00	5.671429e+00	1.580592e+00	5.864473e+00	3.111321e-04
PRI_ER	-3.837500	1.000000e+00	1.728571e+00	0.000000e+00	8.931714e-01	1.242931e-04
forme	-3.935923	3.085202e+01	1.469391e+02	3.994431e+01	1.387549e+02	8.287744e-05
ptot_foret	-3.961730	8.749082e+02	8.227948e+03	1.464108e+03	8.731585e+03	7.440855e-05
sols_vs	-4.204507	1.776305e-02	4.200930e-01	3.310339e-02	4.501719e-01	2.616520e-05
P_FORET	-4.759763	3.153626e-02	3.225303e-01	6.648686e-02	2.876139e-01	1.938208e-06
ER_FAI	-5.172224	4.527650e-02	3.541166e-01	6.529731e-02	2.809101e-01	2.313237e-07

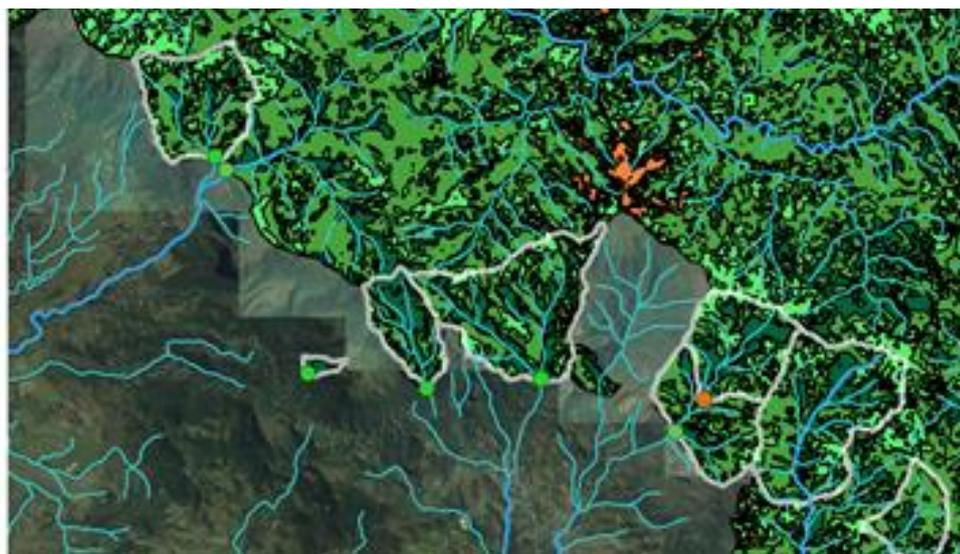
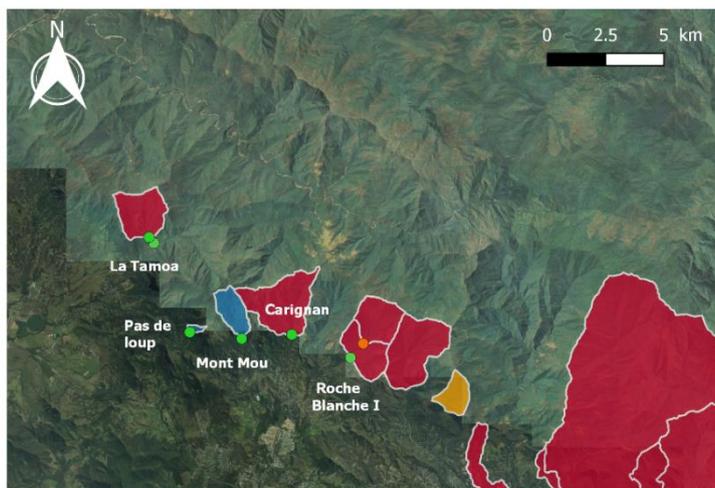
GROUPE 2

	v.test	Moy groupe	Moy générale	sd groupe	sd général	p-value
P_ARBU	6.012241	0.5468197	0.3749666	0.1451982	0.1825180	1.829756e-09
diversite	5.201223	1.4789018	0.7449599	0.7697266	0.9010338	1.979815e-07
ER_MOD	4.580683	0.3030458	0.2087709	0.1044584	0.1314167	4.634603e-06
forme	4.410174	242.7730619	146.9391257	158.7579222	138.7549336	1.032874e-05
nb_patch_f	3.833602	9.1923077	5.6714286	7.0928959	5.8644728	1.262804e-04
ER_FOR	2.459164	0.1978692	0.1524403	0.1563588	0.1179587	1.392611e-02
ER_FAI	-2.676210	0.2363824	0.3541166	0.1333061	0.2809101	7.446004e-03
Fonction	-3.280209	1.1538462	1.6000000	0.4550831	0.8684962	1.037300e-03
P_FORET	-3.293251	0.1741932	0.3225303	0.1164687	0.2876139	9.903586e-04
PRI_ER	-3.558827	1.2307692	1.7285714	0.5044183	0.8931714	3.725146e-04

GROUPE 3

	v.test	Moy groupe	Moy générale	sd groupe	sd général	p-value
P_FORET	7.462117	6.485920e-01	3.225303e-01	1.334068e-01	2.876139e-01	8.514352e-14
ER_FAI	7.212963	6.619451e-01	3.541166e-01	1.289341e-01	2.809101e-01	5.474731e-13
PRI_ER	6.913283	2.666667e+00	1.728571e+00	6.085806e-01	8.931714e-01	4.735638e-12
Fonction	6.119233	2.407407e+00	1.600000e+00	8.281733e-01	8.684962e-01	9.402685e-10
sols_vs	4.980111	7.606935e-01	4.200930e-01	3.404018e-01	4.501719e-01	6.354771e-07
amax_foret	4.245096	1.192869e+06	5.927112e+05	1.216772e+06	9.305718e+05	2.184996e-05
atot_foret	4.091151	1.234134e+06	6.488087e+05	1.231934e+06	9.417247e+05	4.292375e-05
area_km2	2.628707	3.224074e+00	2.397286e+00	2.475724e+00	2.070257e+00	8.571012e-03
PRI_FRAG	2.477890	2.851852e+00	2.585714e+00	4.475202e-01	7.069625e-01	1.321619e-02
ptot_foret	2.388228	1.139603e+04	8.227948e+03	9.651730e+03	8.731585e+03	1.692982e-02
diversite	-2.682829	3.777099e-01	7.449599e-01	6.954212e-01	9.010338e-01	7.300234e-03
P_ARBU	-4.129797	2.604517e-01	3.749666e-01	9.013501e-02	1.825180e-01	3.630841e-05
sols_um	-4.980111	2.393065e-01	5.799070e-01	3.404018e-01	4.501719e-01	6.354771e-07
ER_MOD	-5.181068	1.053287e-01	2.087709e-01	6.751066e-02	1.314167e-01	2.206190e-07
ER_EXT	-5.370659	8.575841e-02	2.846699e-01	7.813098e-02	2.437836e-01	7.844925e-08
P_EPARS	-5.388764	9.094691e-02	3.023992e-01	7.944302e-02	2.582828e-01	7.094385e-08
PRI_OS	-5.599886	1.259259e+00	1.857143e+00	4.382281e-01	7.027642e-01	2.144927e-08

## ANNEXE 16 : ETUDE GRAPHIQUE DES DISCORDANCES ENTRE NIVEAU DE RISQUE DE TURBIDITE ET ETAT DE FONCTIONNALITE DU BASSIN VERSANT – COMMUNE DE PAÏTA



## ANNEXE 17 : DETAILS DU CALCUL DE LA CONSTRUCTION DES STATIONS DE DECANTATION

### Coûts retenus

Capacité (hab)	Coûts de construction	Source	Capacité (hab)	Coûts de	Source
0-250	12	RESCCUE	0-250	0,75	extrapolation
250 - 750	30	RESCCUE	250 - 750	2	PSSE Pouebo
750-1250	50	extrapolation	750-1250	3	extrapolation

Rq : Quand le nombre d'abonnés et non le nombre d'habitants était cité dans le PSSE, le nombre d'abonnés a été multiplié par 3 pour obtenir le nombre d'habitants, d'après une estimation de l'INSEE de 2014 d'en moyenne 3 habitants par foyer (donc par abonné) en Nouvelle-Calédonie. La valeur du nombre d'habitants est donc notée comme « estimée ». Cela est évidemment source de biais dans le calcul des coûts.

### Calcul des coûts de construction – PSSE non consultés (12)

Estimation large à partir du nombre d'habitants de la commune, possibles surestimation pour les communes possédant des forages, l'eau des forages n'ayant habituellement pas besoin d'être traitée.

Commune	Nombre d'habitants (recensement INSEE 2014)	Coût de construction (millions de XPF)	Coût de fonctionnement annuel (millions de XPF)	Captages actifs
Belep	850	50	3	9 captages
Bourail	5550	232	14	11 captages
Canala	3700	150	9	2 forages/12 captages
Hienghene	2500	100	6	2 forages/10 captages
Houailou	4300	182	11	17 captages
Ile des Pins	2000	82	5	6 forages/4 captages
Koumac	4300	182	11	4 forages/1captage
Moindou	700	32	2	3 captages
Poindimié	5000	200	12	2 forages / 16 captages
Ponérihouen	2400	200	12	11 captages
Poum	1300	62	3,75	7 forages /5 captages
Thio	2650	112	6,75	1 forage / 19 captages
Total		1584	95,5	

### Calcul des coûts de construction – PSSE consultés (14)

Estimation à partir du nombre d'habitants desservis par chaque unité de distribution, possibles surestimation pour les communes dont le PSSE date (possible construction de stations de traitement entre temps, ou apparition d'autres UD).

Commune	Date PSSE	N°UD (PSSE)	Nombre d'habitants	Source de la valeur	Coût de construction (millions de XPF)	Coût de fonctionnement annuel (millions de XPF)
Boulouparis	2017	1	750	estimée	32	2
Boulouparis	2017	2	120	estimée	12	0,75
Boulouparis	2017	3	1115	estimée	50	3
Boulouparis	2017	4	1280	estimée	50	3
Boulouparis	2017	6	150	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	1	960	estimée	50	3
Kaala-Gomen	2016	2	120	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	6	140	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	7	70	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	9	120	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	11	45	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	12	45	estimée	12	0,75
Kaala-Gomen	2016	14	20	estimée	12	0,75
Kouaoua	2016	2	110	estimée	12	0,75
Kouaoua	2016	3	170	estimée	12	0,75
Kouaoua	2016	4	135	estimée	12	0,75
Kouaoua	2016	5	180	estimée	12	0,75
Kouaoua	2016	6	90	estimée	12	0,75
La Foa	2012	1	60	estimée	12	0,75
La Foa	2012	2	35	estimée	12	0,75
La Foa	2012	3	?	inconnue	-	-
Pouebo	2017	2	500	estimée	32	2
Pouebo	2017	3	20	estimée	12	0,75
Pouebo	2017	4-5	1000	estimée	50	3
Pouebo	2017	6	500	connue	32	2
Pouebo	2017	7	500	connue	32	2
Pouebo	2017	8	150	connue	12	0,75
Pouebo	2017	9	600	connue	32	2
Pouebo	2017	10	100	connue	12	0,75
Pouebo	2017	11	20	connue	12	0,75
Poya	2015	1	250	estimée	12	0,75
Poya	2015	2	35	estimée	12	0,75
Poya	2015	4	210	estimée	12	0,75
Poya	2015	6	60	estimée	12	0,75
Poya	2015	7	370	estimée	32	2
Poya	2015	8	50	estimée	12	0,75
Poya	2015	9	480	estimée	32	2
Touho	2017	2	130	connue	12	0,75
Touho	2017	3	1220	connue	50	3
Touho	2017	4	50	connue	12	0,75
Touho	2017	5	10	connue	12	0,75
Yate	2015	1	450	estimée	32	2
Yate	2015	2	120	estimée	12	0,75
Yate	2015	3	30	estimée	12	0,75
Yate	2015	4	480	estimée	32	2
Yate	2015	5	270	estimée	32	2
Yate	2015	6	210	estimée	12	0,75
Yate	2015	8	20	estimée	12	0,75
Yate	2015	9	10	estimée	12	0,75
Dumbea	2014	3	250	estimée	12	0,75
VKP	2014	6	?	inconnue	-	-
VKP	2014	11	30	estimée	12	0,75
VKP	2014	13	280	estimée	30	2
VKP	2014	16	90	estimée	12	0,75
VKP	2014	17	20	estimée	12	0,75
VKP	2014	18	90	estimée	12	0,75
VKP	2014	19	390	estimée	30	2
VKP	2014	20	?	inconnue	-	-
Paita	2015	1	13500	estimée	550	33
Paita	2015	2	40	estimée	12	0,75
Paita	2015	4	3550	estimée	150	9
Paita	2015	5	1350	estimée	12	0,75
Ouegoa	2011	1	100	connue	12	0,75
Ouegoa	2011	3	?	inconnue	-	-
Ouegoa	2011	5	60	connue	12	0,75
Sarraméa	2010	2	60	estimée	12	0,75
Sarraméa	2010	4	75	estimée	12	0,75
Poum	2009	1	200	connue	12	0,75
Poum	2009	4	80	connue	12	0,75
Poum	2009	7	?	inconnue	-	-
Total					2678	164

