



LIVRET D – GESTION ET PROTECTION DES EAUX SUPERFICIELLES ET SOUTERRAINES

**Commune de Yaté et du Mont-Dore
Nouvelle-Calédonie**

Volet E – Etat des lieux hydrologique et hydrogéologique

REDACTION	Vale Nouvelle-Calédonie SAS	Jean-Luc FOLIO Christelle RENDU
VERIFICATION	Vale Nouvelle-Calédonie SAS	Tanguy GIBAND
APPROBATION	Vale Nouvelle-Calédonie SAS	David CHIRON Daryush KHOSHNEVISS

SOMMAIRE

5	ETAT DES LIEUX HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	1
5.1	CLIMATOLOGIE	1
5.1.1	Précipitations	1
5.1.1.1	Comparaison inter-postes des pluies annuelles	1
5.1.1.2	Précipitations annuelles et mensuelles	2
5.1.1.3	Régionalisation des pluies sur le secteur de Goro.....	10
5.1.2	Evapotranspiration.....	11
5.1.2.1	Analyse des études antérieures (GOLDER, 2002a)	11
5.1.2.2	Nouvelle estimation de l'évapotranspiration pour le bassin de la Kwé	12
5.2	EAUX DE SURFACE.....	15
5.2.1	Régime hydrologique	15
5.2.2	Débits moyens annuels et modules	18
5.2.2.1	Bassin versant de la Kwé	19
5.2.2.2	Rivière des Lacs - station Le Goulet.....	23
5.2.2.3	Rivière Bleue - Embouchure.....	24
5.2.3	Débits moyens mensuels	24
5.2.3.1	Bassin versant de la Kwé	26
5.2.3.2	Rivière des Lacs - Le Goulet	29
5.2.3.3	Rivière Bleue - Embouchure.....	30
5.2.4	Débits journaliers et débits extrêmes.....	31
5.2.4.1	Variabilité journalière des débits	31
5.2.4.2	Analyse des crues	33
5.2.4.3	Analyse des étiages.....	48
5.2.5	Synthèse du fonctionnement hydrologique du bassin de la Kwé	52
5.2.6	Bilans hydrologiques	53
5.2.7	Qualité physico – chimique des eaux superficielles	58
5.2.7.1	Etat actuel de la qualité des rivières	58
5.2.7.2	Transport solide – Analyse des MES	61
5.2.8	Qualité biologique des rivières	68
5.2.8.1	Etat initial.....	68
5.2.8.2	Caractérisation de la faune d'eau douce	69
5.2.8.3	Suivi des cours d'eau.....	74
5.2.8.3.1	Suivi de la faune ichtyenne et carcinologique de la Kwé et des rivières périphériques	74
5.2.8.3.2	La Rivière Kwé (d'après Erbio, 2012)	76
5.2.8.3.3	Suivi des macro-invertébrés	83
5.2.9	Qualité des sédiments.....	86
5.2.9.1	Valeurs guides	86
5.2.9.2	Qualité des sédiments jusqu'en 2005.....	87
5.2.9.3	Tendance actuelle (suivi réglementaire)	89
5.2.10	Qualité biologique des eaux de dolines et plans d'eau	90
5.2.10.1	Etat initial.....	90
5.2.10.2	Inventaire faunistique des zones humides	91
5.2.11	Usage de la ressource	92
5.2.11.1	Principaux usages	92
5.2.11.2	Périmètres de protection des eaux (PPE).....	93
5.3	EAUX SOUTERRAINES	95

5.3.1	Paramètres hydrodynamiques.....	95
5.3.1.1	Conductivité hydraulique (perméabilité)	95
5.3.1.2	Coefficient d'emménagement et de porosité	96
5.3.2	Recharge des nappes.....	97
5.3.3	Grandes directions d'écoulement dans le profil d'altération	97
5.3.3.1	Choix des périodes hydrologiques analysées	98
5.3.3.2	Aquifère principal	98
5.3.3.3	Aquitard latéritique	100
5.3.4	Analyse des amplitudes piézométriques	101
5.3.5	Caractérisation du comportement captif ou libre de la nappe présente dans l'aquifère principal	101
5.3.6	Analyse des gradients piézométriques verticaux	102
5.3.7	Synthèse des observations piézométriques	104
5.3.8	Connexions interbassins prouvées	104
5.3.9	Connexions interbassins suspectées	106
5.3.9.1	Connexion Grand Lac – KO4 : Axe Grand Lac	106
5.3.9.2	Connexion Plaine des lacs – KO4 : Axe de l'ancien aérodrome	111
5.3.10	Connexions interbassins hypothétiques	111
5.3.11	Relations nappes-rivières	112
5.3.12	Relations nappes-lacs-dolines.....	113
5.3.13	Qualité des eaux souterraines	114
5.3.13.1	Fond géochimique tous secteurs confondus	116
5.3.13.2	Fond géochimique par unité hydrostratigraphique	117
5.3.13.3	Comparaison des analyses chimiques et des fonds géochimiques avec des critères de qualité	120
5.3.14	Usage	121

FIGURES

Figure 1 :	Évolution comparée des précipitations annuelles dans le secteur de Goro	2
Figure 2 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Yaté Usine	3
Figure 3 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Rivière Bleue	4
Figure 4 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Le Goulet (Station DAVAR)	5
Figure 5 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Port Boisé Col (Station DAVAR)	6
Figure 6 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à la station A (Pépinère)	7
Figure 7 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à la station B (Usine)	8
Figure 8 :	Données pluviométriques annuelles et mensuelles à la station C (mine)	9
Figure 9 :	Pondération des pluies régionales sur la pluie sur le bassin versant de la plaine des Lacs	11
Figure 10 :	Comparaison de la répartition annuelle de l'ETP (GOLDER, 2002a) avec les stations Nouméa, Moué et Yaté Mairie	12
Figure 11 :	Comparaison des ETP Météo France et GOLDER	12
Figure 12 :	Comparaison des ETP décennales Penman-Montheith et Oudin (non corrigées)	13
Figure 13 :	ETP Oudin journalière corrigée utilisée dans les bilans hydrologiques 1998-2011	14
Figure 14 :	ETP Oudin corrigée utilisée dans les bilans hydrologiques 1998-2011, moyennes mensuelles	14
Figure 15 :	Bassins versants du site de Goro et de ses alentours	16
Figure 16 :	Schéma hydraulique du bassin versant de la Kwé, débits moyens annuels et modules	18
Figure 17 :	Débits moyens annuels caractéristiques à la station KAL	20
Figure 18 :	Débits moyens annuels caractéristiques à la station KNL	21
Figure 19 :	Débits moyens annuels caractéristiques à la station KOL	22
Figure 20 :	Débits moyens annuels caractéristiques de la Rivière des Lacs, station Le Goulet (DAVAR)	23
Figure 21 :	Débits moyens annuels caractéristiques de la Rivière Bleue à l'embouchure	24
Figure 22 :	Débits moyens mensuels caractéristiques de la Kwé Principale à la station KAL	26
Figure 23 :	Débits moyens mensuels caractéristiques de la Kwé Nord à la station KNL	27
Figure 24 :	Débits moyens mensuels caractéristiques de la Kwé Ouest à la station KOL	28
Figure 25 :	Débits moyens mensuels caractéristiques de la Rivière des Lacs, station Le Goulet	29
Figure 26 :	Débits moyens mensuels caractéristiques de la Rivière Bleue à l'embouchure	30
Figure 27 :	Variabilité journalière des débits de la Kwé Principale, station KAL	32
Figure 28 :	Variabilité journalière des débits de la Kwé Nord, station KNL	32
Figure 29 :	Débits de pointe de crue observés sur le bassin de la Kwé	35
Figure 30 :	Saisonnalité et intensité des crues à la station KAL	36
Figure 31 :	Saisonnalité et intensité des crues à la station KNL	36
Figure 32 :	Analyse fréquentielle des débits de crues à la station KAL	38
Figure 33 :	Analyse fréquentielle des débits de crue à la station KNL	38
Figure 34 :	Courbes enveloppes d'estimation des débits de pointe centennaux (DAVAR)	40
Figure 35 :	Couple averse – crue du 29/02/2000 aux stations KAL et KNL	43

Figure 36 :	Couple averse – crue du 16/07/2003 à la station KAL	43
Figure 37 :	Couple averse – crue du 23/03/2008 aux stations KAL, KNL et KOL	44
Figure 38 :	Couple averse – crue du 14/01/2011 (dépression Vania) aux stations KAL et KOL	44
Figure 39 :	Couple averse – crue du 03/07/2013 aux stations KAL et KNL	45
Figure 40 :	Caractéristiques d'étiages à la station KAL sur la période 1996-2012	50
Figure 41 :	Résultats d'analyse fréquentielle des DCE à la station KAL	50
Figure 42 :	Caractéristiques d'étiage à la station KNL sur la période 1996-2008.....	51
Figure 43 :	Résultats d'analyse fréquentielle des DCE à la station KNL	51
Figure 44 :	Comparaison des débits caractéristiques de l'année type 2007 sur 3 stations de la Kwé.....	53
Figure 45 :	Résultats de simulation à la station KAL	55
Figure 46 :	Résultats de simulation à la station KNL	56
Figure 47 :	Résultats de simulation à la station KOL.....	56
Figure 48 :	Résultats de simulation au « bassin intermédiaire »	57
Figure 49 :	Analyse du seuil de précipitation de prépondérance des écoulements souterrains – station KAL	58
Figure 50 :	Projection des signatures chimiques des eaux de surface dans le diagramme de Piper suivant la composition chimique des eaux prélevées (A2EP, 2014a)	59
Figure 51 :	Relations entre le flux sédimentaire et le débit à la rivière de Ouenghi	62
Figure 52 :	Analyse des relations entre caractéristiques de crue et flux sédimentaire, station KAL.....	65
Figure 53 :	Analyse des relations entre caractéristiques de crue et flux sédimentaire, station KNL	66
Figure 54 :	Stations de suivi des indices biotiques	74
Figure 55 :	Localisation des tronçons prospectés dans la Kwé	77
Figure 56 :	Résultats des analyses granulométriques en 2011 aux stations 3-A et 3-B (Kwé Ouest, juillet 2011)	89
Figure 57 :	Schéma de représentation des périmètres de protection des eaux	94
Figure 58 :	Distribution de la perméabilité de la péridotite mesurée en fonction de la profondeur dans le contexte de Goro.....	96
Figure 59 :	Chronique du niveau piézométrique enregistré dans le piézomètre 10EX0221, périodes hydrologiques, années hydrologiques et saisons.	98
Figure 60 :	Comportements de la nappe suivant la position de la surface piézométrique par rapport au toit de l'aquifère.	102
Figure 61 :	Coupe schématique d'une plateforme piézométrique.....	103
Figure 62:	Secteur Grand Lac : Evolution comparée des niveaux piézométriques et du niveau du Grand lac entre août 2012 et janvier 2014. Piézomètres 12EX0208, 12EX0214 et 12EX0228	109
Figure 63:	Secteur Grand Lac : Evolution comparée des niveaux piézométriques et du niveau du Grand lac entre août 2012 et janvier 2014. Piézomètres 12EX0242, 12EX0235 et 12EX0229	109
Figure 64:	Secteur Grand Lac : Evolution comparée des niveaux piézométriques et du niveau du Grand lac durant l'étiage de septembre 2012	110
Figure 65:	Projection des signatures chimiques des eaux souterraines dans le diagramme de Piper en fonction de l'hydrostratigraphie (A2EP, 2014a).....	117

TABLEAUX

Tableau 1 :	Pluies composites obtenues à partir de la méthode des Polygones de Thiessen.....	10
Tableau 2 :	Caractéristiques des bassins versants et des écoulements	15
Tableau 3 :	Bilans hydriques aux stations de jaugeage (1996–2012)	17
Tableau 4 :	Débits moyens annuels et modules aux principales stations de jaugeages	19
Tableau 5 :	Caractéristiques des débits mensuels aux stations de jaugeage (m ³ /s)	25
Tableau 6 :	Caractéristiques de débit classé aux stations KAL et KNL	33
Tableau 7 :	Débits de crues aux différentes stations de jaugeage (m ³ /s)	34
Tableau 8 :	Valeurs caractéristiques de crue aux stations de jaugeage	39
Tableau 9 :	Estimation des débits de pointe aux stations de jaugeage par méthode DAVAR	40
Tableau 10 :	Caractéristiques de ruissellement des plus fortes crues observées sur la Kwé	46
Tableau 11 :	Caractéristiques d'étiage médian aux stations de jaugeage	48
Tableau 12 :	Quantiles de DCE aux stations KAL et KNL	49
Tableau 13 :	DCE et module sur l'année type 2007	52
Tableau 14 :	Bilans hydrologiques annuels – synthèse des résultats de simulation	54
Tableau 15 :	Statistiques descriptives des résultats d'analyses chimiques obtenus pour les eaux de surface (A2EP, 2014a)	60
Tableau 16 :	Estimation du transport solide sur la Kwé	62
Tableau 17 :	Estimation du flux sédimentaire annuel de la Kwé [Landloch, 2004]	63
Tableau 18 :	Caractéristiques de crue et flux sédimentaires aux stations KAL et KNL	67
Tableau 19 :	Qualité des habitats des principales rivières du secteur de Goro	70
Tableau 20 :	Synthèse des travaux réalisés sur l'ichtyofaune et les invertébrés (état initial)	71
Tableau 21 :	Ichtyofaune recensée dans les rivières Kwé et Trou bleu	72
Tableau 22 :	Crustacés décapodes recensés dans les rivières du secteur de Goro (état initial)	73
Tableau 23 :	Résultats des campagnes de suivi des indices biotiques	74
Tableau 24 :	Historique du suivi de la faune d'eau douce depuis 2000	75
Tableau 25 :	Localisation et description des points de suivi de la faune ichtyologique	75
Tableau 26 :	Résultats du suivi de la faune ichtyologique et carcinologique de juin 2012	76
Tableau 27 :	Résultats du suivi de la faune ichtyologique et carcinologique de la rivière Kwé en juin 2012	78
Tableau 28 :	Effectifs et richesse spécifique de la faune ichtyologique des stations inventoriées de la Kwé Ouest et la Kwé Principale depuis 2000	81
Tableau 29 :	Positionnement des stations d'inventaire ichtyofaune et de la faune carcinologique sur KO4 et KO5	82
Tableau 30 :	Localisation et description des points de suivi pour l'IBNC	84
Tableau 31 :	Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2010	84
Tableau 32 :	Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2011	85
Tableau 33 :	Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2012	85
Tableau 34 :	Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2011	86
Tableau 35 :	Qualité des sédiments	87
Tableau 36 :	Etat initial de la qualité des sédiments de rivière dans la région de Goro (2000)	88
Tableau 37 :	Synthèse des travaux réalisés sur les lacs et les dolines de la région de Goro	90
Tableau 38 :	Macro-invertébrés recensés dans la doline de l'usine pilote et dans deux dolines de référence	90

Tableau 39 :	Coordonnées des stations d'inventaire faunistique des zones humides	91
Tableau 40 :	Localisation et description des captages	93
Tableau 41:	Gammes de conductivité hydraulique mesurées ou estimées suivant les différentes formations géologiques	96
Tableau 42 :	Porosité effective suivant les différentes unités hydrogéologiques	97
Tableau 43 :	Porosité totale pour les différentes formations géologiques	97
Tableau 44 :	Synthèse des observations sur les interactions entre les rivières et la nappe principale.....	113
Tableau 45 :	Statistiques descriptives des résultats d'analyses chimiques obtenus pour les eaux souterraines (A2EP, 2014a).....	115
Tableau 46 :	Fond géochimique par unité hydrostratigraphique (A2EP, 2014a)	118
Tableau 47 :	Pourcentage de dépassement du critère en fonction des différents secteurs et de ses formations géologiques associées (A2EP, 2014a).....	120

5

ETAT DES LIEUX HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

 Pièces graphiques – Carte D03 – Cadre hydrologique

5.1 CLIMATOLOGIE

 Se référer au document - Synthèse climatologique –Secteur de Goro (A2EP, 2012c)

5.1.1 Précipitations

Les périodes de référence présentées dans ce chapitre sont 1990-2009 (DAVAR) et 1997-2012 (VNC). La période 1997-2009 correspond à un moment où les données sont disponibles sur le plus grand nombre de stations du site de Goro, sans présenter de lacunes majeures. Cette période est jugée représentative avec une variabilité importante (année 2005 sèche, année 2008 humide en particulier).

Pour cette période, les données des 7 stations suivantes ont fait l'objet d'une analyse :

- 1 station Météo France situées au nord de la plaine des Lacs : Yaté Usine ;
- 3 stations DAVAR : Rivière Bleue, Port Boisé Col et Goulet ;
- 3 stations VNC : Pépinière (Station A), Usine (Station B) et Mine (Station C).

Depuis 2011, les postes pluviométriques de VNC sont gérés par Météo France.

5.1.1.1 Comparaison inter-postes des pluies annuelles

Sur ces 7 stations, la moyenne inter-postes est de 2 930 mm/an avec un écart-type de 735 mm/an (Figure 1).

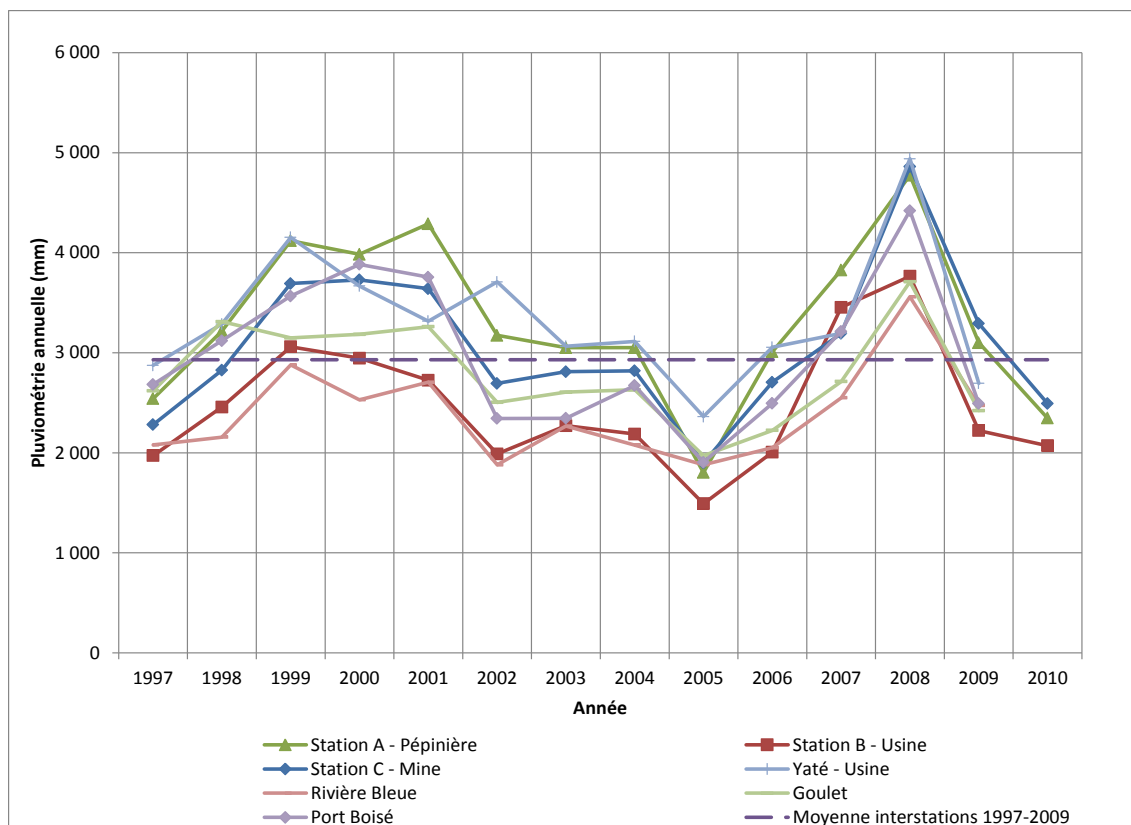


Figure 1 : Évolution comparée des précipitations annuelles dans le secteur de Goro

5.1.1.2 Précipitations annuelles et mensuelles

Afin de caractériser les précipitations régionales sur la zone de Goro et à proximité, les Figure 2 : à 8 illustrent à chaque station :

- la variabilité interannuelle sur l'ensemble de la période d'observation (certaines pluies annuelles ont été reconstituées et/ou étendues à des périodes plus longues, la plus longue période étant 1951 – 2012). Sur ces figures, sont représentées les pluies annuelles sur l'ensemble de la période, la moyenne interannuelle des précipitations ainsi que la moyenne mobile sur 5 ans qui permet d'analyser les tendances à moyen termes et ainsi mettre en évidence les épisodes El Niño (moins pluvieux) et La Niña (plus pluvieux). On constate ainsi que la période 1984-1990 est une période très humide, de même que la période 1998-2004. A l'inverse, la période 1968-1983 est une période sèche. La période plus récente est caractérisée par une pluviométrie moyenne, avec notamment une année 2008 très humide. L'année 1977 a été caractérisée par une faible pluviométrie. Plus récemment, c'est l'année 2005 qui a été très sèche ;
- la variabilité saisonnière au niveau de chaque station (moyenne, minimum et maximum mensuels) est représentative des deux saisons principales avec une période humide de novembre à avril et une période sèche de septembre à novembre, la période d'avril à mai étant la saison de transition. Selon les stations, les pics mensuels se produisent entre janvier et avril.

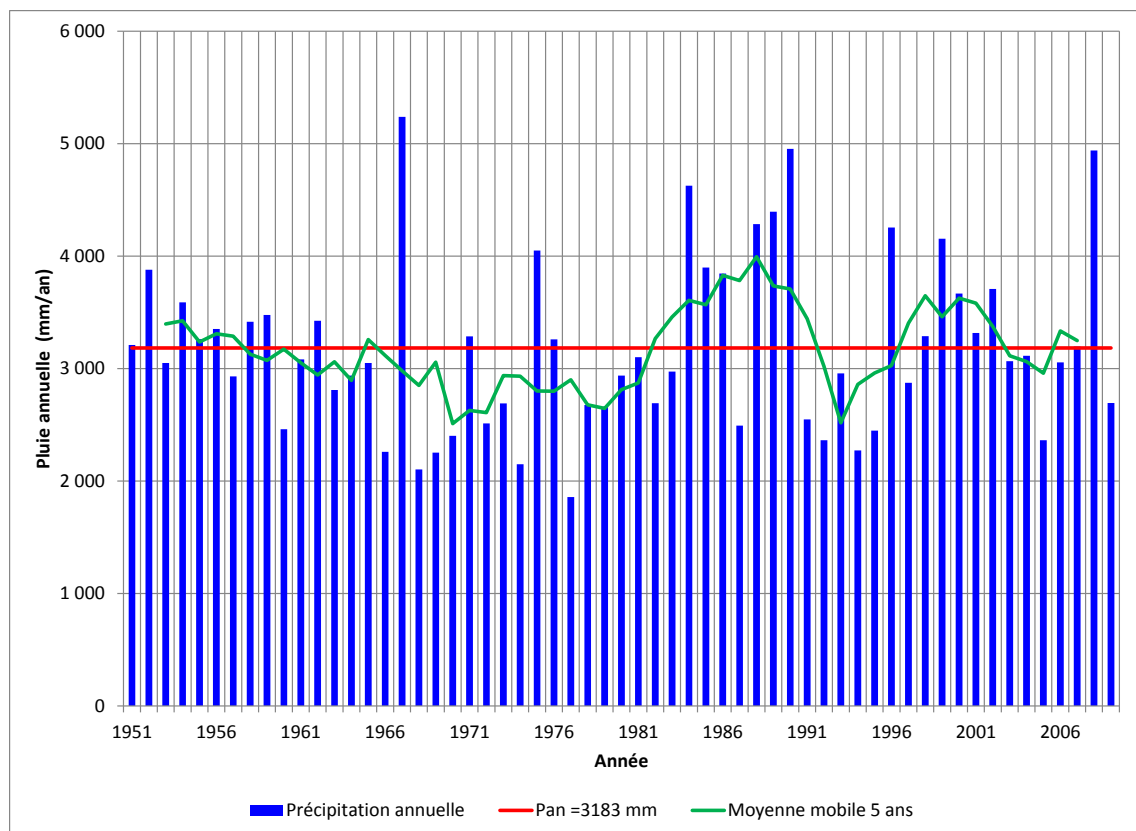


Figure 2 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Yaté Usine

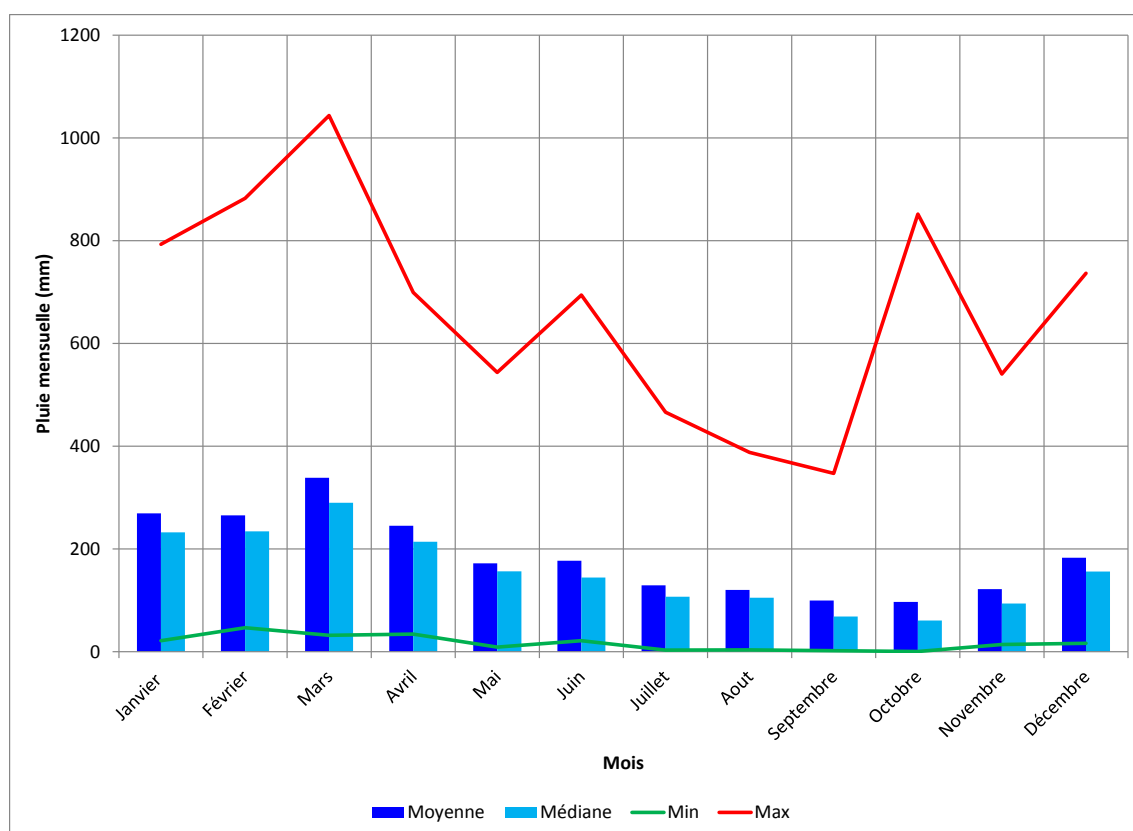
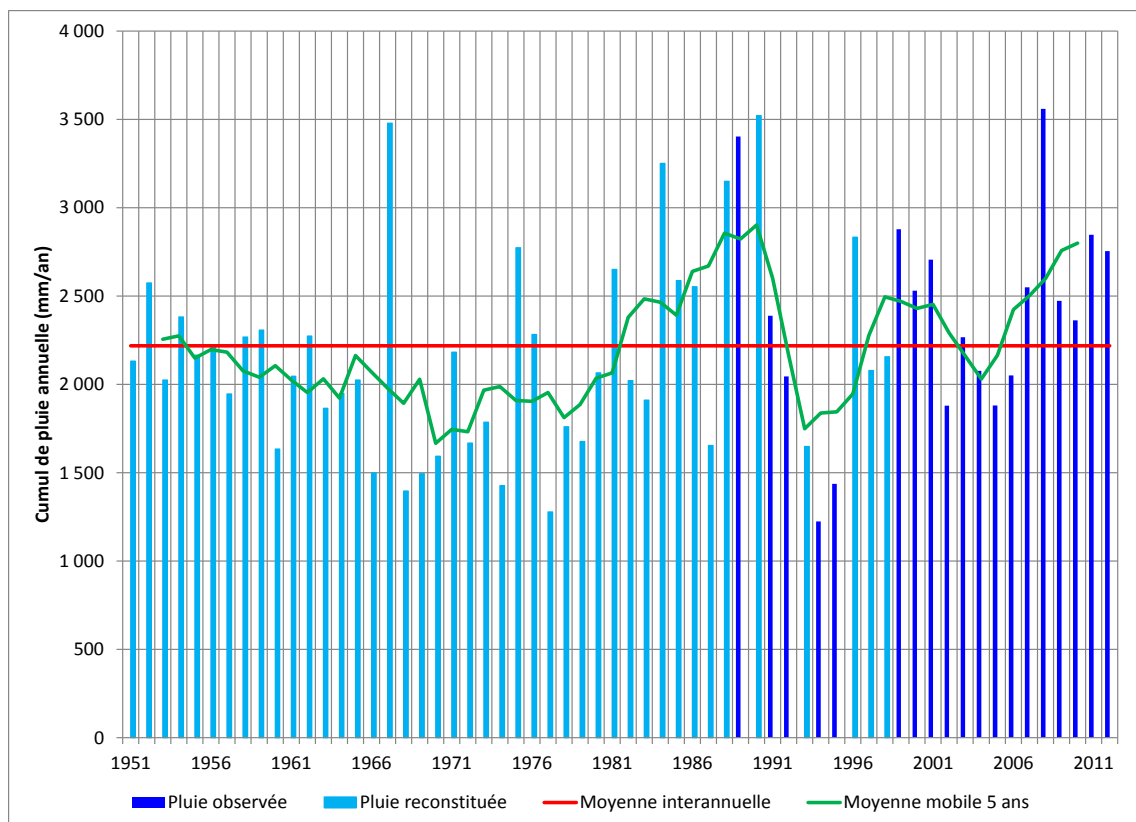


Figure 3 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Rivière Bleue

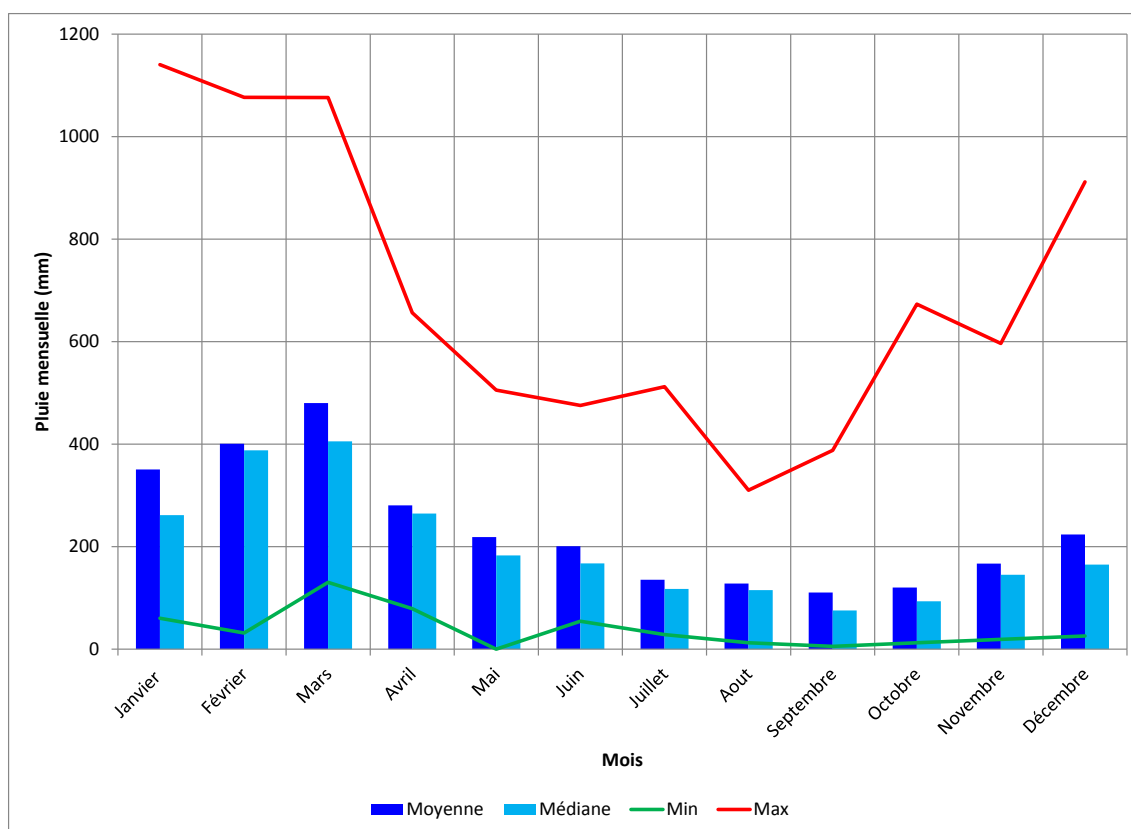
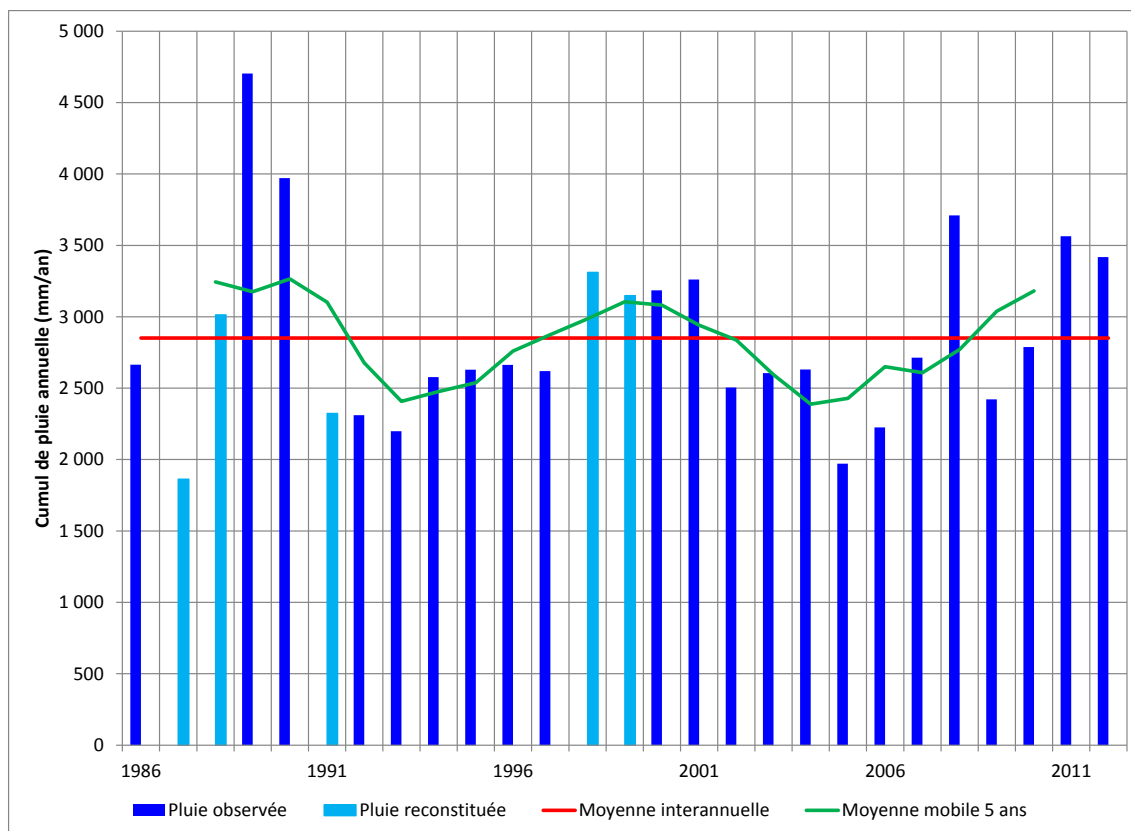


Figure 4 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Le Goulet (Station DAVAR)

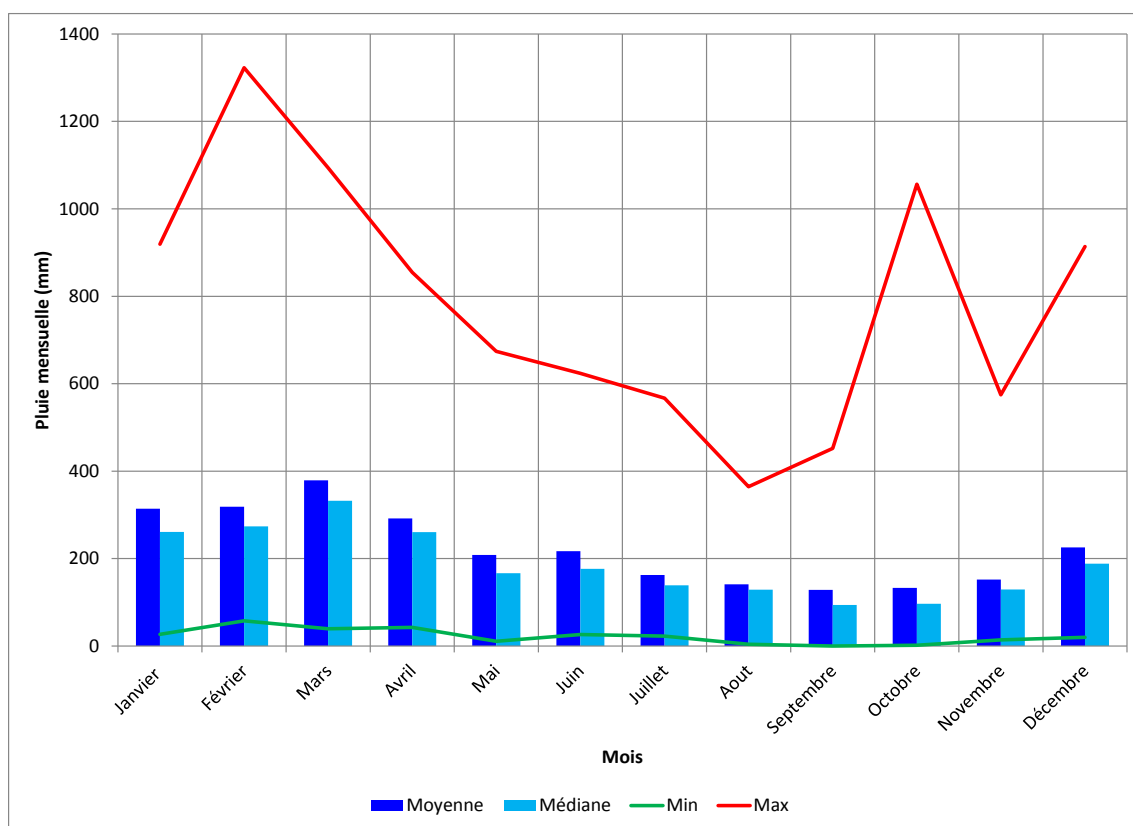
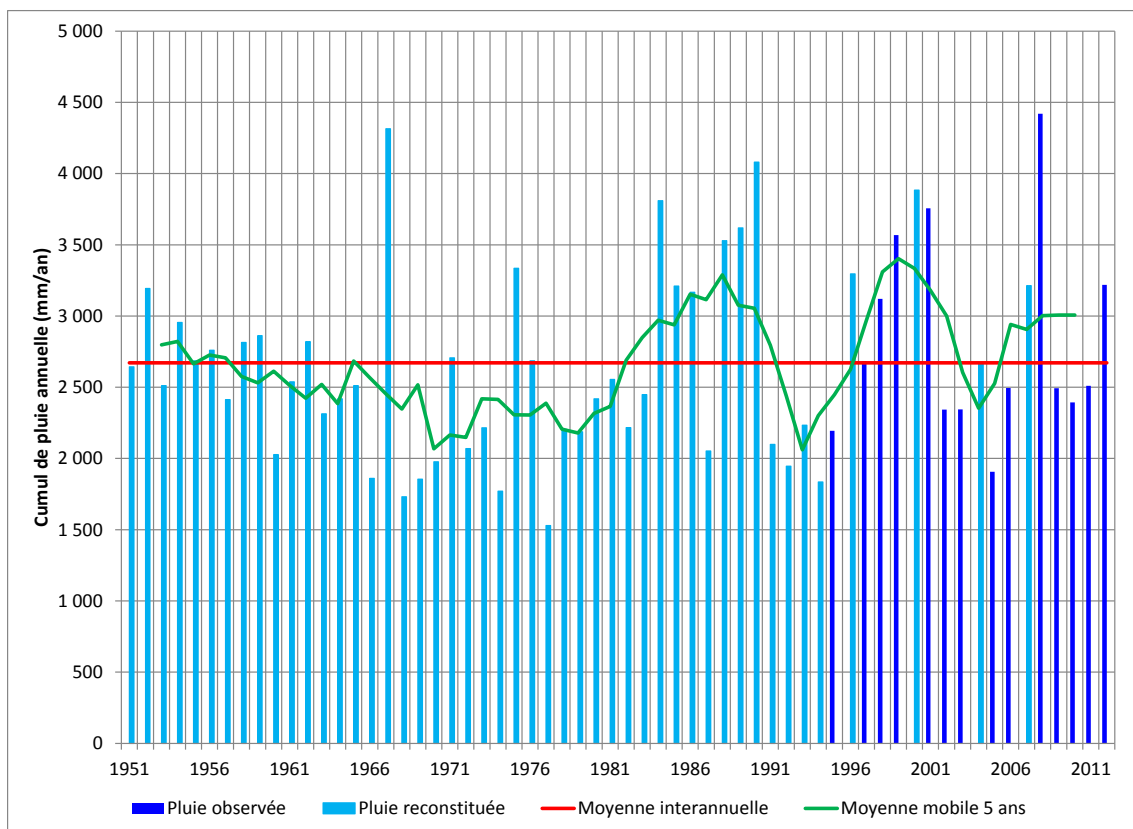


Figure 5 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à Port Boisé Col (Station DAVAR)

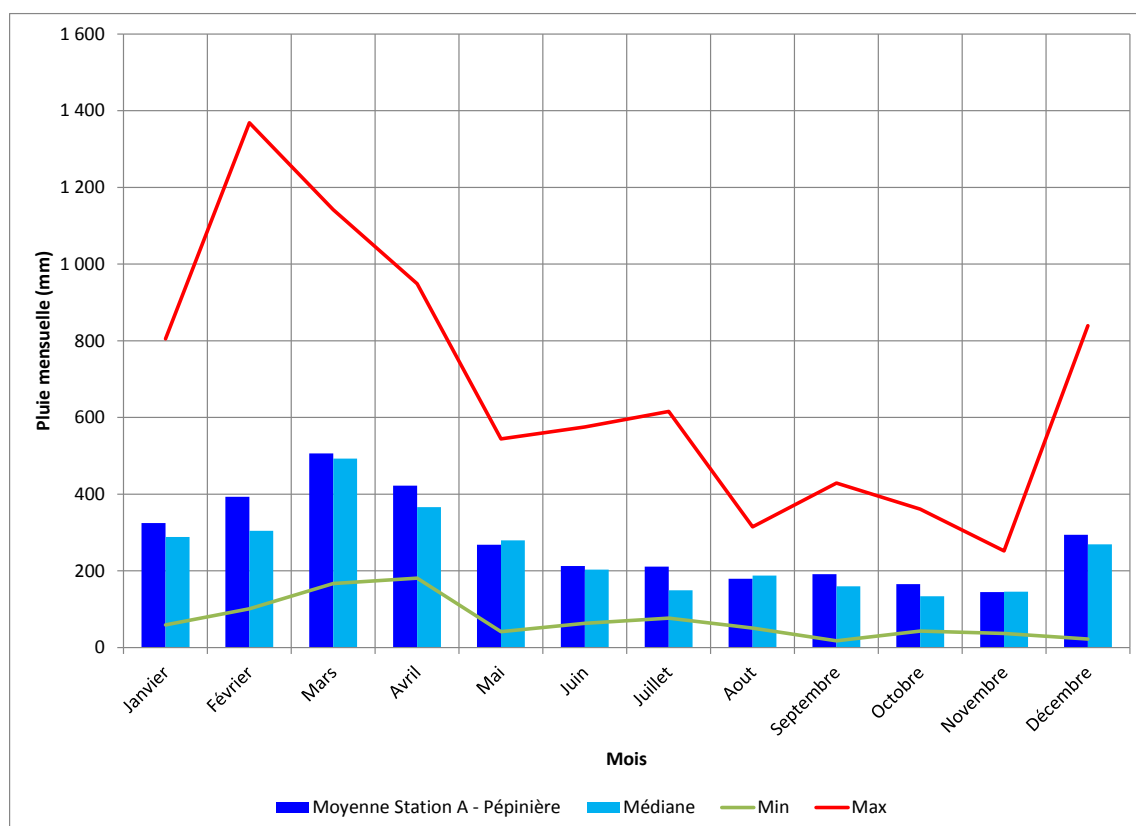
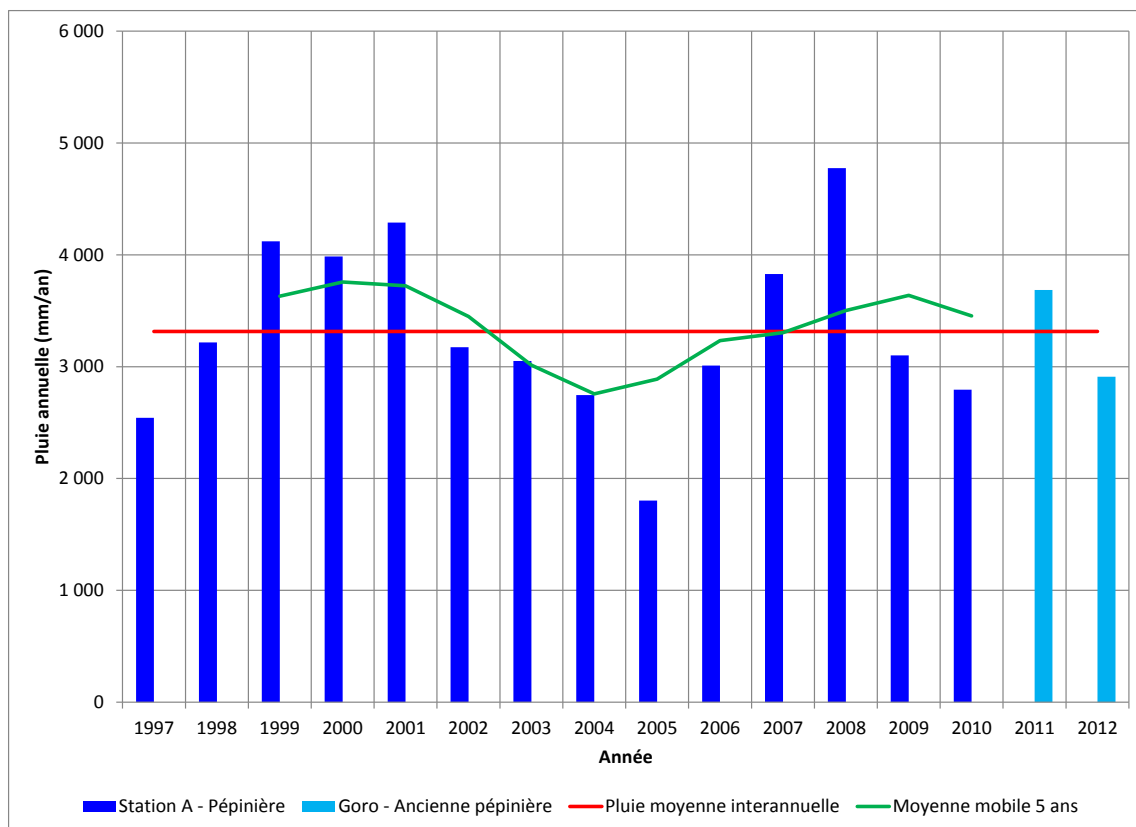


Figure 6 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à la station A (Pépinière)

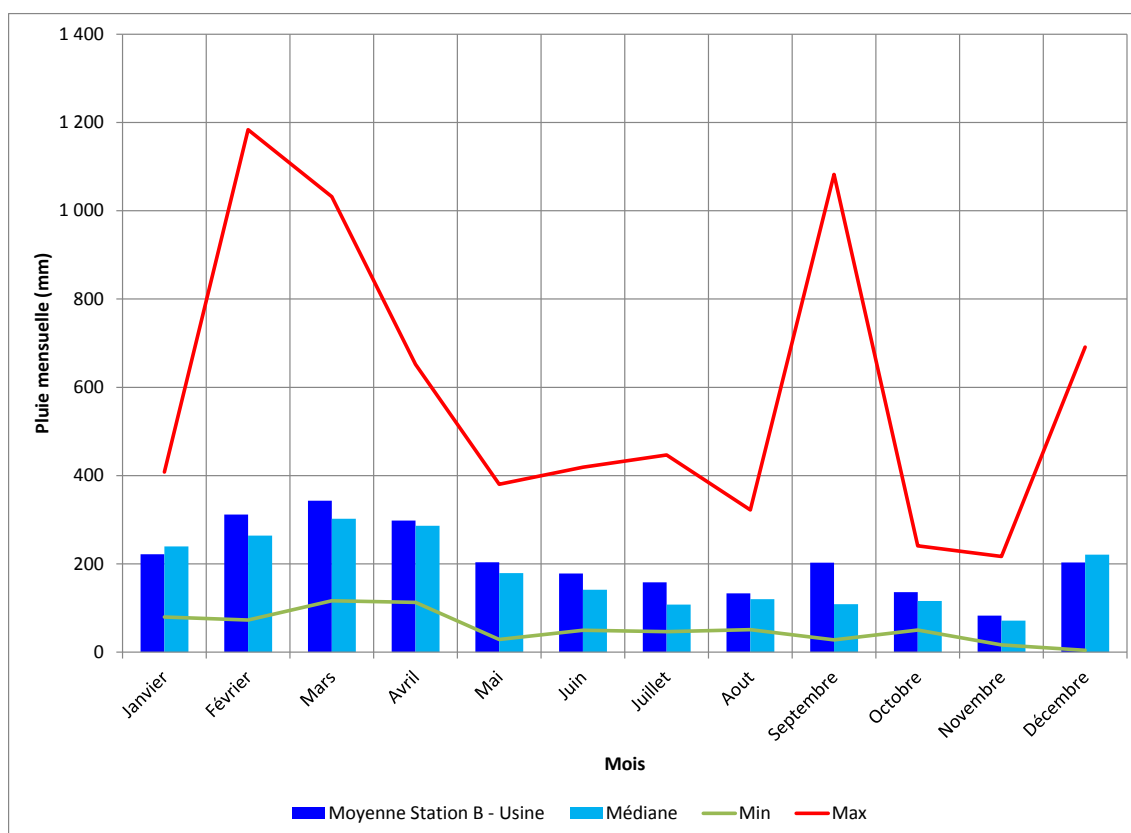
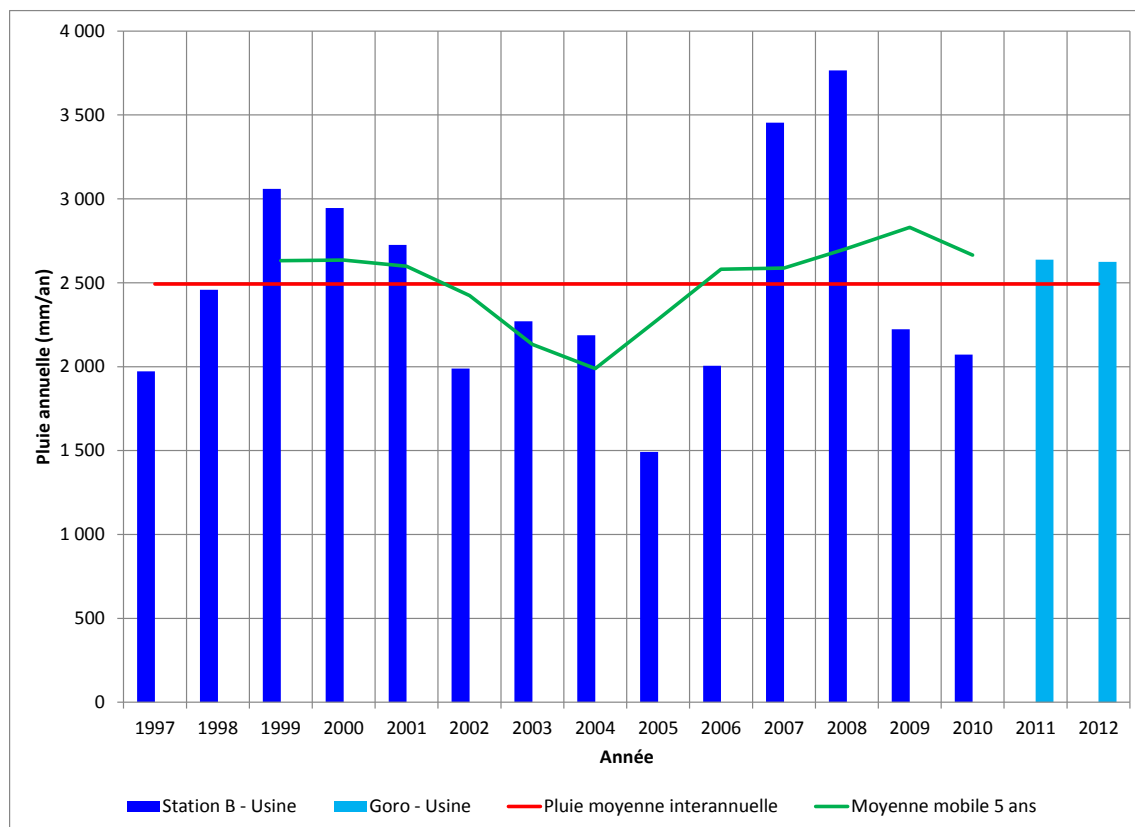


Figure 7 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à la station B (Usine)

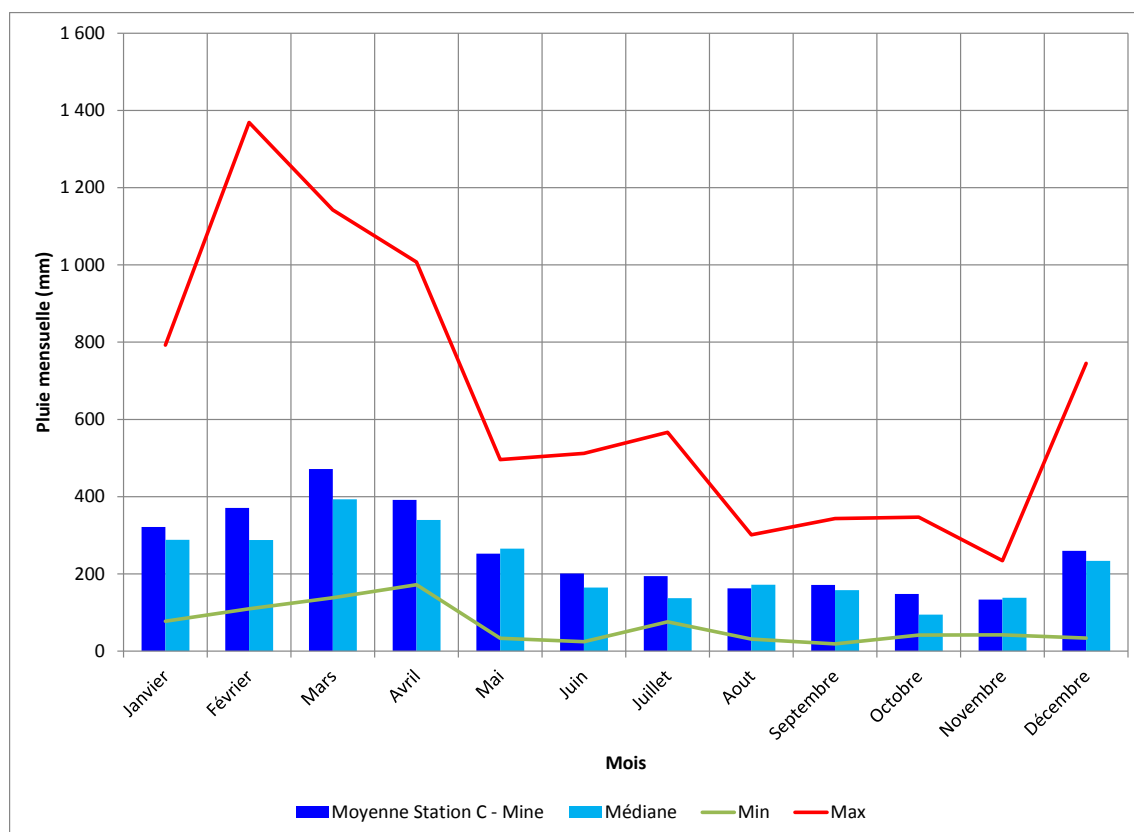
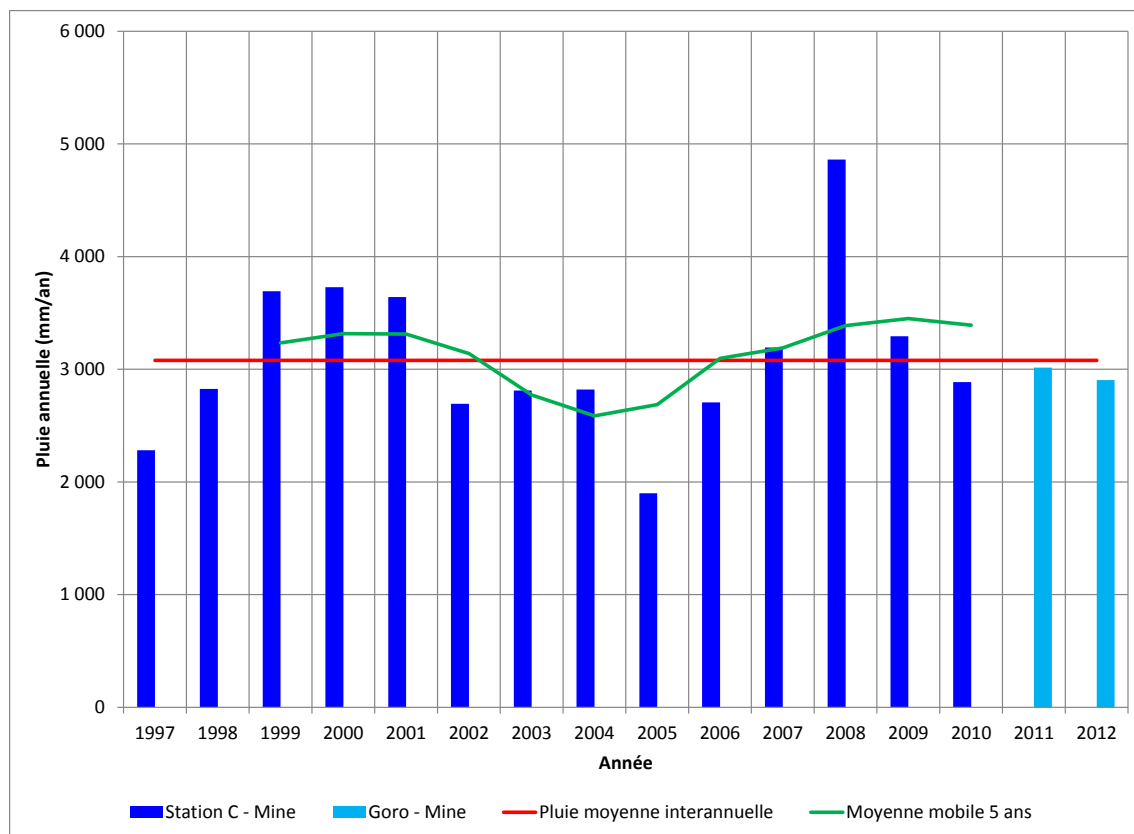


Figure 8 : Données pluviométriques annuelles et mensuelles à la station C (mine)

5.1.1.3 Régionalisation des pluies sur le secteur de Goro

A l'issue d'une analyse bibliographique (ORSTOM, 1972 ; 1973a ; 1973b ; GOLDER, 2002a ; DAVAR, 2011) et du fait de la complexité de la pluviométrie sur le site de Goro (position géographique et effet orographique), l'approche retenue de spatialisation des pluies régionales sur ce secteur est la méthode géométrique des polygones de Thiessen. Cette dernière a été mise en œuvre à partir des 8 stations pluviométriques ayant des données concomitantes sur la période 1997-2010 :

- les 3 stations VNC : Pépinière (Station A), Mine (Station C), et Usine Vale (Station B) ;
- les 3 stations DAVAR : Rivière Bleue, Port Boisé Col, et Goulet ;
- les 2 stations Météo France situées au nord de la Plaine des Lacs : Yaté Usine et Yaté Mairie.

Le Tableau 1 récapitule les pluies composites calculées qui ont été utilisées pour la réalisation de bilans hydrologiques (*Bilans hydrologiques – Bassin versant de la Kwé et Plaine des Lacs (A2EP, 2012d)*). La répartition des pluies régionales issue de la méthode des polygones de Thiessen est présentée à la Figure 9. La station Yaté Mairie est pondérée pour moins de 1 % pour la régionalisation des pluies sur le bassin versant de la Plaine des Lacs. Ce pourcentage est intégré, dans le Tableau 1, au pourcentage de la Station A (Pépinière).

La pluviométrie, relativement homogène sur les bassins versants de la Kwé Ouest (KO4) et de la Kwé Nord (FM25), en référence aux stations Mine (Station C), Pépinière (Station A) et Port Boisé Col, permet de penser que cette méthode classique des polygones de Thiessen est adaptée pour obtenir une pluie régionale représentative.

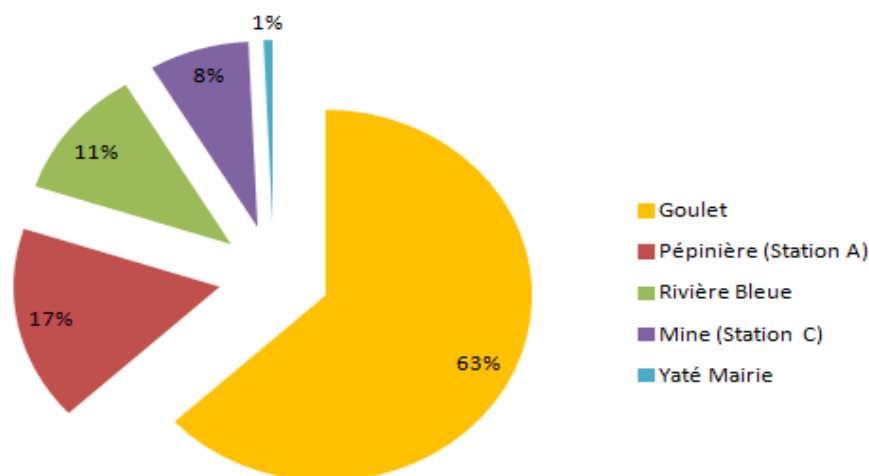
Au niveau du grand bassin versant de la Plaine des Lacs, seules les stations Pépinière et Goulet sont disponibles. Il existe donc un risque de sous-évaluation de la pluviométrie sur ce bassin par la méthode des polygones de Thiessen. Ce risque ne semble toutefois pas vérifié dans la mesure où les résultats obtenus en utilisant la méthode des polygones sont cohérents avec les mesures calculées par la DAVAR.

Précisément, alors que la méthode des polygones de Thiessen évalue une pluviométrie moyenne de 2 901 mm/an pour la période 1997-2009, la DAVAR calcule une moyenne de 2 779 mm/an pour la période 1971-2001 (DAVAR, 2009), soit un écart limité de 4%, ce qui est cohérent.

Tableau 1 : Pluies composites obtenues à partir de la méthode des Polygones de Thiessen

					Station pluviométrique				
					Station A (Pépinière)	Station C (Mine)	Port Boisé Col	Goulet	Rivière Bleue
Station limnimétrique	Rivière	Bassin versant	Surface topographique (km ²)	Pluie annuelle et pluie composite 1997-2009 (mm/an)	3403	3065	2976	2819	2432
KAL	Kwé	Kwé Principale	31,37	3141	24%	70%	6%		
KNL	Kwé Nord	Kwé Nord	10,37	3285	65%	35%			
KOL	Kwé Ouest	Branche KO4	11,96	3052		85%	15%		
PDL	Rivière des Lacs	Plaine des Lacs à Goulet	81,48	2901	18%	8%		63%	11%
GL	Rivière des Lacs	sortie de Grand Lac	20,31	3269	64%	31%		5%	

Source : A2EP, 2012



Source : A2EP, 2012c

Figure 9 : Pondération des pluies régionales sur la pluie sur le bassin versant de la plaine des Lacs

5.1.2 Evapotranspiration

5.1.2.1 Analyse des études antérieures (GOLDER, 2002a)

 Source : Extrait du rapport intitulé GOLDER, 2002. Background Hydrology (Goro: GOLDER). Doc-B-227. 266p.

Dans le cadre de la réalisation d'un bilan hydrologique de la Kwé, GOLDER a défini :

- une valeur annuelle d'ETP basée sur celle de la station Météo France de Nouméa (1 761 mm/an en moyenne sur la période 1986-2000) ;
- une distribution mensuelle de l'ETP obtenue suite au calage d'un modèle hydrologique.

Depuis, de nouvelles données (ETP normalisée Penman-Montheith) issues des stations C (Mine) et Rivière-Blanche ont été acquises par Météo France, respectivement pour 2002-2005 et 2002-2004. Ces données présentent certaines lacunes pour la station C (pas une seule année complète) mais fournissent néanmoins des éléments de comparaison.

A l'issue de ce travail de comparaison, l'ETP estimée par GOLDER apparaît critiquable à plusieurs niveaux:

- la valeur annuelle de l'ETP GOLDER (Figure 10) est supérieure à celle de la station de Moué (1 390 mm). Or, selon Météo-France (2001), elle devrait plutôt être proche de celle du bassin de la Kwé. Elle est également supérieure à celle de la station Météo France Yaté Mairie (1 340-1 390 mm) ;
- la moyenne annuelle sur la période 2002-2004 est de 1 132 mm/an à la Station C et de 1 298 mm/an à Rivière Blanche. Ces valeurs sont significativement inférieures à celles retenues par GOLDER (Figure 11) ;
- la courbe de distribution mensuelle des ETP est très plate, et ne correspond pas à celles des trois stations régionales de Nouméa, de Moué et de Yaté Mairie, ni à celles des stations locales Rivière Blanche et station C (Mine) (Figure 11). En moyenne, l'ETP GOLDER est plus importante que celle des stations de mesure en saison de transition et en saison fraîche, et moins importante en saisons humide et sèche, surévaluant ainsi l'évapotranspiration au cours de ces saisons.

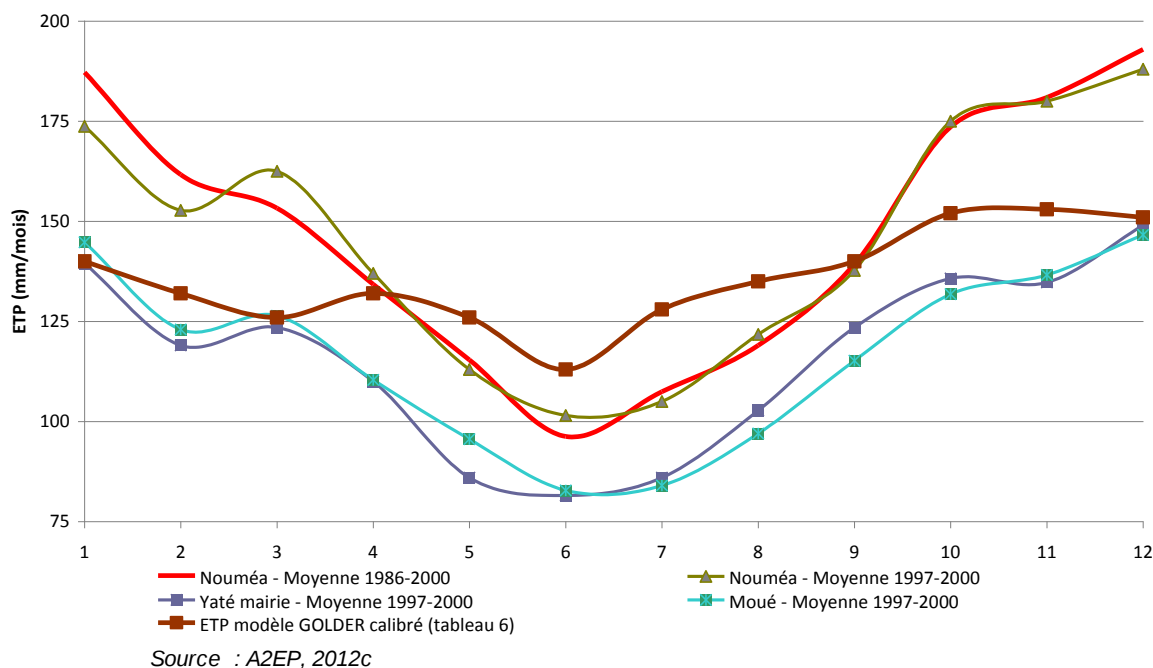


Figure 10 : Comparaison de la répartition annuelle de l'ETP (GOLDER, 2002a) avec les stations Nouméa, Moué et Yaté Mairie

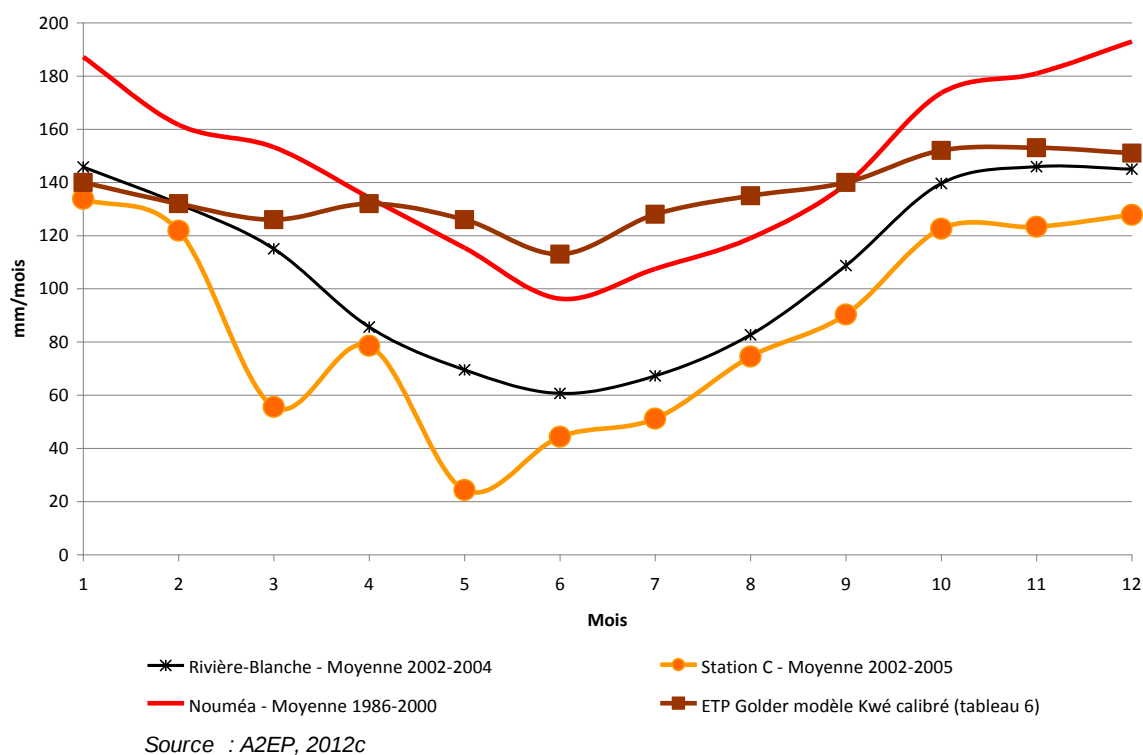


Figure 11 : Comparaison des ETP Météo France et GOLDER

5.1.2.2 Nouvelle estimation de l'évapotranspiration pour le bassin de la Kwé

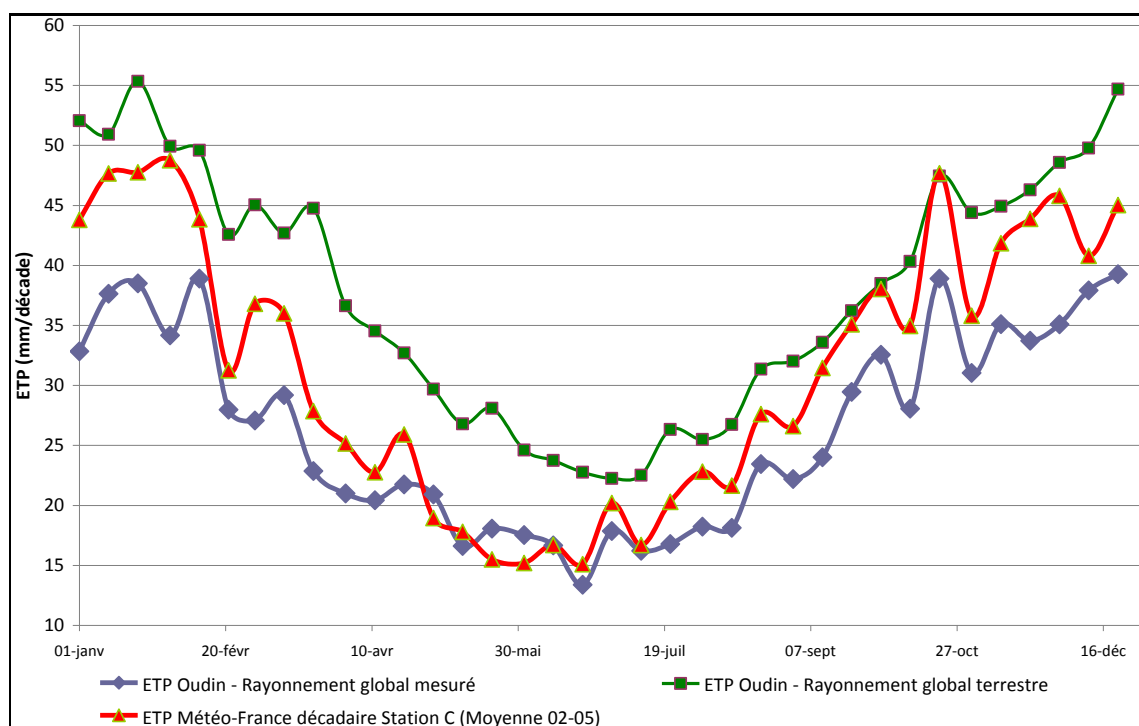
Afin de pallier les lacunes des mesures observées à partir de 2005 pour les nombreux paramètres nécessaires à la détermination de l'ETP Penman-Montheith, une nouvelle approche a été mise en œuvre.

Elle est basée sur le calcul de l'ETP Oudin (OUDIN, 2004, OUDIN et al. 2005a et 2005b) qui ne nécessite que de 2 paramètres : la température et le rayonnement global. Cette méthode a été validée sur de nombreux bassins versants permettant de couvrir de nombreux contextes climatiques, sous toutes latitudes.

Afin de disposer de la chronique d'ETP la plus longue possible, l'approche suivante a été retenue :

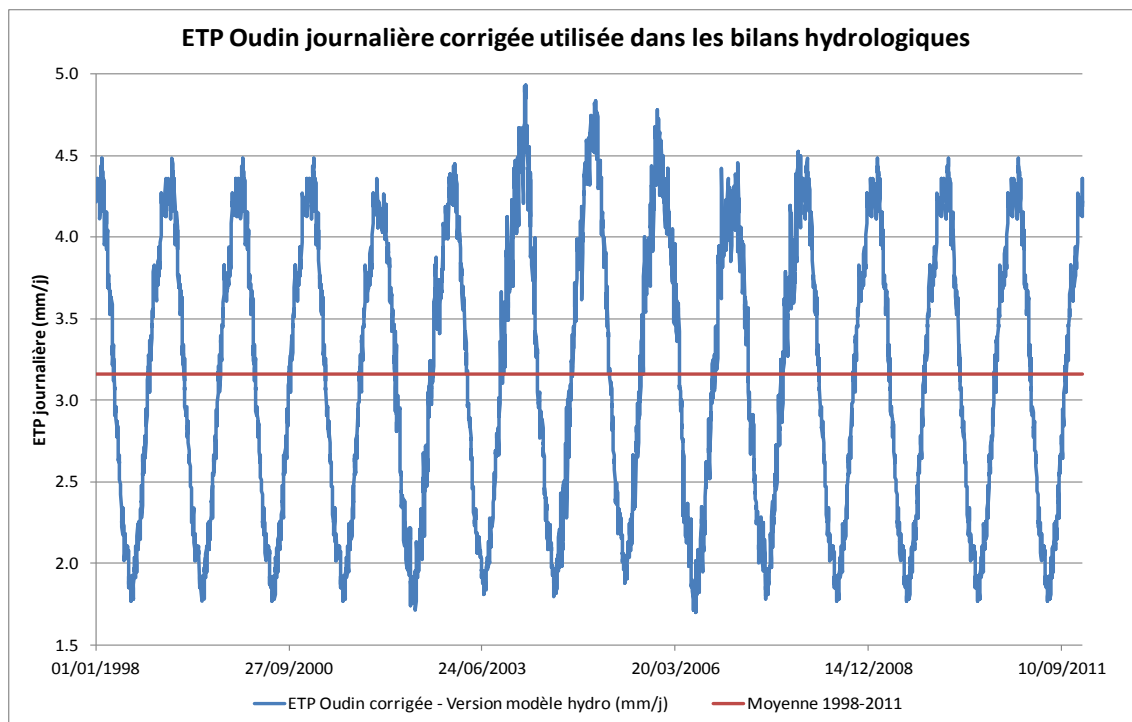
- calculer une ETP Oudin à l'aide des températures et du rayonnement global mesurés à la station C (Mine) ainsi que du rayonnement global planétaire théorique donné par la latitude de la station C ($22^{\circ}16'2,3''S$) ;
- comparer l'ETP Oudin et l'ETP Penman-Montheith fournis par Météo France pour la station C (Mine) sur la période 2002-2005 ;
- définir un coefficient de correction entre les ETP Oudin et Météo France ;
- calculer une chronique d'ETP Oudin corrigée au pas de temps journalier (Figure 13) et mensuel (Figure 14) pour la période 1998-2011.

Sur cette base, l'ETP moyenne interannuelle 1998-2011 est estimée à 1 154 mm/an pour le bassin de la Kwé, ce qui représente 37 % des précipitations (3 141 mm/an).



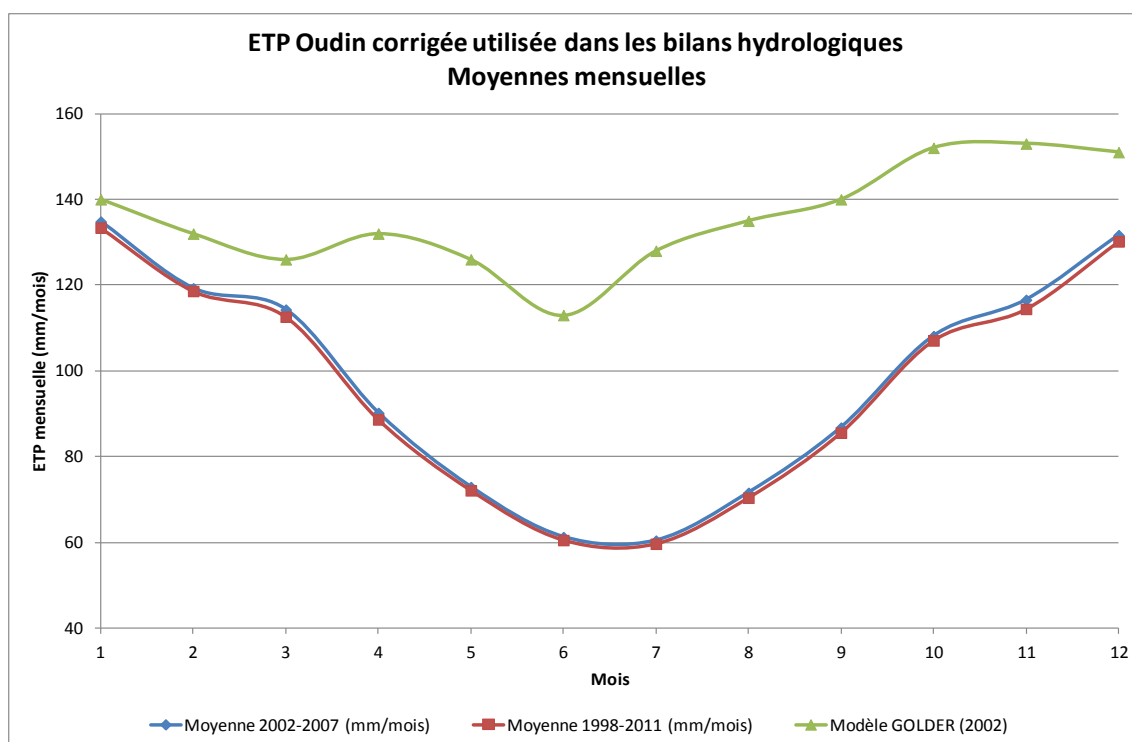
Source : A2EP, 2012c

Figure 12 : Comparaison des ETP décennales Penman-Montheith et Oudin (non corrigées)



Source : A2EP, 2012c

Figure 13 : ETP Oudin journalière corrigée utilisée dans les bilans hydrologiques 1998-2011



Source : A2EP, 2012c

Figure 14 : ETP Oudin corrigée utilisée dans les bilans hydrologiques 1998-2011, moyennes mensuelles

5.2 EAUX DE SURFACE

 Se référer au document - Synthèse hydrologique –Secteur de Goro (A2EP, 2012, e)

L'hydrologie du bassin de la Kwé est relativement complexe et constituée d'un certain nombre de mécanismes régissant l'écoulement des cours d'eau. Cet écoulement résulte de la combinaison de "l'écoulement de base" restitué par le système des nappes phréatiques, de "l'écoulement hypodermique" (écoulement souterrain rapide à travers des fissures ouvertes et des zones d'infiltration dans la couche de sol superficielle) et du "ruissellement" à la surface d'un sol à faible perméabilité ou temporairement saturé. Le ruissellement de surface et l'écoulement hypodermique constituent "l'écoulement rapide" qui, sur la zone d'étude, résulte de l'écoulement en surface et de l'écoulement dans l'aquifère superficiel dans la couche de cuirasse de fer.

5.2.1 Régime hydrologique

Le régime hydrologique des rivières de Goro est suivi grâce aux observations de plusieurs stations hydrométriques. Parmi celles-ci, trois stations de mesures des débits installées sur le bassin de la Kwé et sur ses principaux affluents présentent des séries suffisamment significatives pour le suivi du régime. Il s'agit de la station KAL sur la Kwé Principale, de la station KNL sur la Kwé Nord (remplacée en 2008 par la station KN14) et de la station KOL sur la Kwé Ouest. Les écoulements sur le site sont mesurés depuis 1995. Le suivi en continu mis en place sur la rivière Kwé Est (station KE05) est trop récent pour permettre de dégager des éléments statistiques relatifs au régime de cet affluent de la Kwé Principale.

La DAVAR dispose de deux stations de mesures d'écoulement situées à proximité du site de Goro : la station Le Goulet sur la rivière des Lacs située à 9 km au nord-ouest du site et dont les enregistrements ont commencé en 1956, et la station de la rivière Bleue à l'embouchure, à 12 km à l'ouest du site, dont les observations ont débuté en 1974.

Dans la suite de cette partie, les données des stations KAL, KOL et KNL (puis KN1) et des 2 stations de la DAVAR sont analysées pour la description des écoulements aux pas de temps annuels, mensuels et journaliers. Lorsqu'elles présentent des lacunes, elles sont complétées et consolidées à l'aide des données des stations du site ainsi que celles des deux stations régionales situées dans les environs de Goro.

Le Tableau 2 présente les caractéristiques des bassins versants jaugés sur la zone d'étude et à proximité, ainsi que la longueur des chroniques observées.

Tableau 2 : Caractéristiques des bassins versants et des écoulements

Station	Rivière	Superficie (km ²)	Taille de l'échantillon
KAL	Kwé Principale	32,97	1996 – 2012 (16 ans)
KNL	Kwé Nord	10,37	1995-2002 et 2005-2008 (12 ans)
KOL	Kwé Ouest	11,93	2005 -2012 (7 ans)
Goulet	Rivière des lacs	77	1958 – 2010 (53 ans)
Embouchure	Rivière Bleue	33,3	1974 – 2010 (37 ans)

Les principaux bassins versants directement et indirectement impactés par le projet minier de VNC ainsi que les bassins versants proches du site sont représentés sur la Figure 15. Les stations de mesure des débits permettant la description des écoulements sur la zone de l'étude et à proximité y sont également représentées.

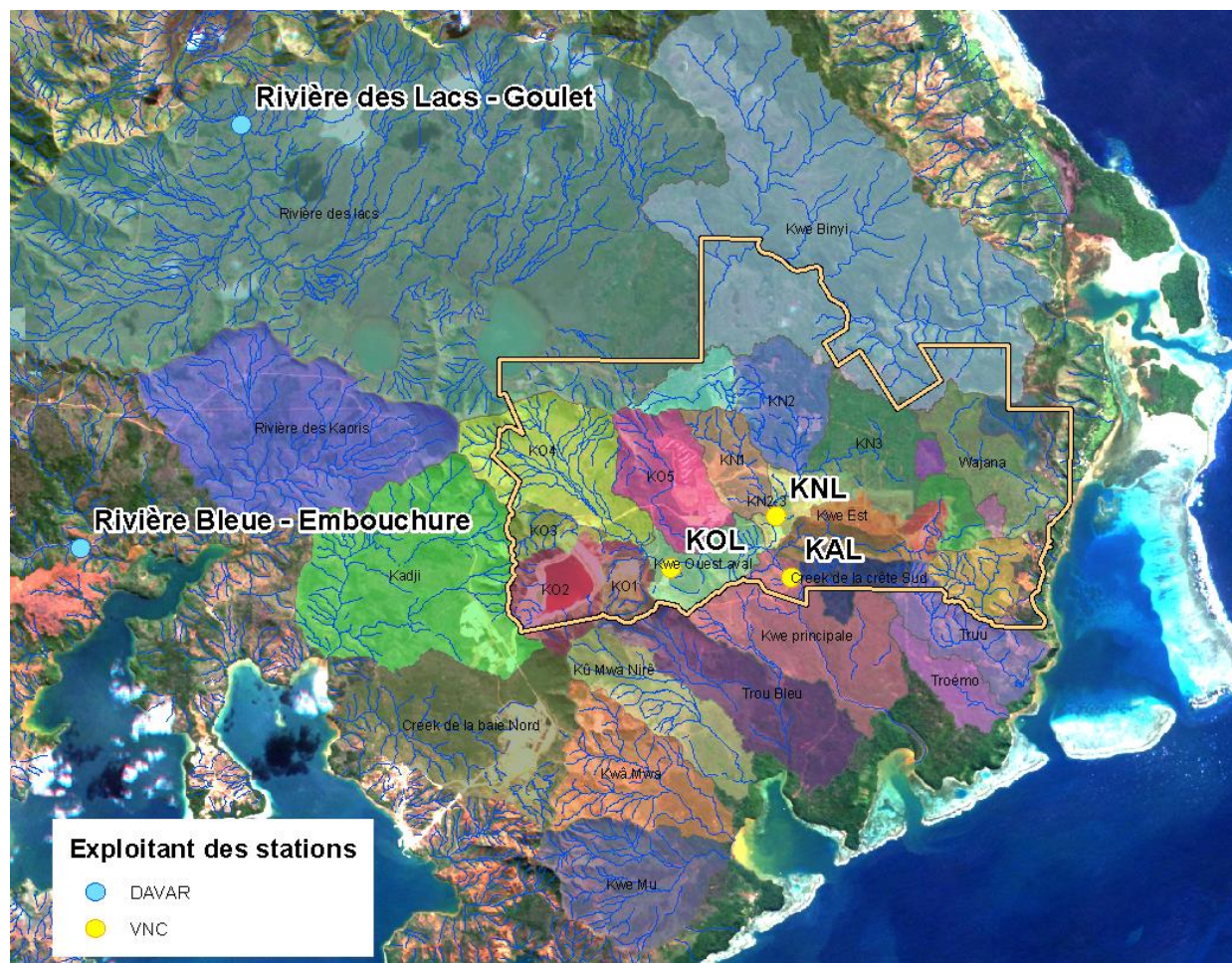


Figure 15 : Bassins versants du site de Goro et de ses alentours

Le Tableau 3 présente un bilan hydrique aux différentes stations de jaugeage sur la zone de l'étude et ses environs (rivière Bleue et rivière des Lacs). Ce tableau renseigne sur la superficie des bassins versants drainés aux stations de jaugeage (S), la pluviométrie interannuelle (Pan), la lame d'eau annuelle ruisselée (L), le coefficient de ruissellement (CR), le module annuel (Qan) et le débit spécifique (q_s).

A des fins de comparaison, le module interannuel est estimé à partir des seules valeurs observées aux différentes stations de jaugeage, sur la période commune 1996-2012 (sauf pour les stations de jaugeage de la DAVAR où les données n'étaient disponibles que jusqu'en 2010).

Tableau 3 : Bilans hydriques aux stations de jaugeage (1996–2012)

	S km ²	Pan mm	L mm	CR	Qan m ³ /s	Qs l/s/km ²
KAL	32,97	3141	2166	0,69	2,26	69
KNL	10,37	3285	2607	0,79	0,86	83
KOL	11,93	3052	1378	0,45	0,52	44
Rivière des Lacs à Goulet	77	2783	2336	0,84	5,70	74
Rivière Bleue à l'embouchure	33,3	2423	1826	0,75	1,93	58

On remarque que les débits spécifiques de KAL et KNL sont similaires. En revanche, ils sont plus faibles à KOL. Cette différence peut s'expliquer non seulement par une courte durée d'observation des écoulements (début des observations en 2006 et nombreuses lacunes) mais surtout par les nombreuses particularités hydrogéologiques du bassin versant (présence de sources en aval de la station KOL).

Au niveau des stations régionales, en revanche, on remarque que le débit spécifique de la rivière des Lacs à Goulet est similaire à celui des Kwé Nord et Principale. Par contre, celui de la rivière Bleue est plus faible. Cette différence peut s'expliquer par la pluviométrie ainsi que par la morphologie des bassins versants, la rivière des Lacs étant principalement constituée d'une zone humide.

Les coefficients de ruissellement annuels varient de 0,45 à 0,79 sur la Kwé. Si l'on fait exception de la station KOL on remarque que les coefficients de ruissellement annuels aux stations KAL et KNL, même s'ils sont un peu plus faibles qu'aux stations régionales, restent dans des ordres de grandeur similaires.

La

Figure 16 fournit un schéma du bassin versant de la Kwé dans la zone de projet indiquant la superficie des bassins versants contributifs ainsi que les modules des cours d'eau jaugés, les lames d'eau annuelles ruisselées ainsi que les débits spécifiques.

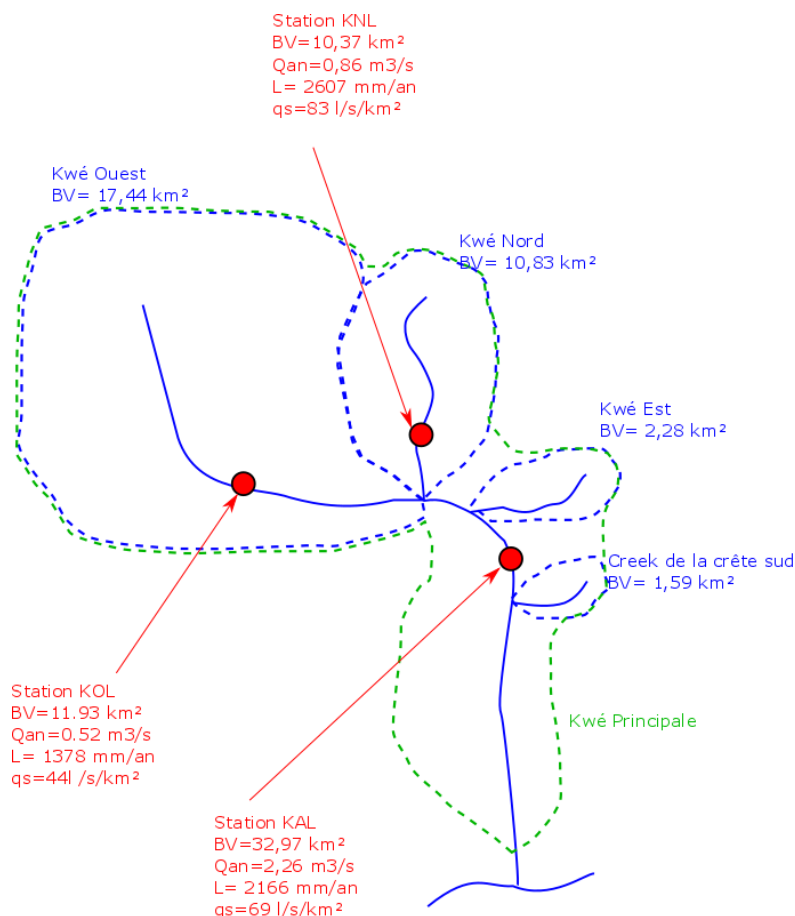


Figure 16 : Schéma hydraulique du bassin versant de la Kwé, débits moyens annuels et modules

5.2.2 Débits moyens annuels et modules

Les débits moyens annuels et interannuels (modules) de la rivière Kwé (station limnimétrique KAL) et de ses 2 principaux affluents (Kwé Ouest à la station KOL et Kwé Nord à la station KNL) ainsi que ceux de la rivière des Lacs au Goulet et de la rivière Bleue à l'embouchure sont analysés dans les paragraphes suivants.

Pour les autres cours d'eau les données disponibles (jaugeages mensuels et suivi en continu depuis mai 2011) ne permettent pas encore de proposer des estimations de débits interannuels ou annuels.

Le **débit moyen annuel** correspond, pour une année donnée, à la moyenne des débits moyens journaliers. Le **débit interannuel** est la moyenne des débits moyens annuels sur une période d'observation suffisamment longue pour être représentative des débits mesurés ou reconstitués. Il est fréquemment dénommé **“module”**. Il permet de caractériser l'écoulement d'une année “moyenne”.

L'ensemble des analyses effectuées dans ce chapitre a été réalisé sur l'année hydrologique telle que définie par la DAVAR (novembre–octobre). Les débits moyens annuels et les modules de la

période 1996–2012 aux stations de jaugeage de la zone d'étude (KAL, KNL et KOL) et à proximité du site (Rivière des Lacs à Goulet et Rivière Bleue à l'embouchure) sont synthétisés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Débits moyens annuels et modules aux principales stations de jaugeages

	Cours d'eau de la zone d'étude			Cours d'eau à proximité du site	
	Kwé Principale KAL	Kwé Nord KNL	Kwé Ouest KOL	Rivière Bleue Embouchure	Rivière des Lacs Goulet
1996	2,38	0,86	0,56	1,76	5,83
1997	2,11	0,83	0,56	2,31	6,11
1998	1,49	0,64	0,44	1,41	4,61
1999	2,47	0,92	0,62	2,32	6,73
2000	3,33	1,21	0,70	2,55	8,42
2001	2,88	1,05	0,65	2,20	6,28
2002	1,93	0,75	0,49	1,44	4,41
2003	1,89	0,68	0,40	1,43	4,37
2004	1,85	0,70	0,37	1,77	5,00
2005	1,51	0,58	0,34	1,51	4,20
2006	1,92	0,68	0,37	1,55	4,56
2007	2,38	0,88	0,59	2,22	6,35
2008	3,15	1,54	0,89	2,60	8,51
2009	2,29	0,87	0,48	2,27	5,73
2010	1,66	0,64	0,33	1,54	4,35
2011	2,47	0,89	0,55	-	-
2012	2,75	0,99	0,51		
Moyenne	2,26	0,86	0,52	1,93	5,70

La variabilité interannuelle des écoulements sur chacun de ces bassins versants est présentée dans les sections suivantes. Les tendances à moyen terme (sur une période de 5 ans) sont également étayées à l'aide de moyennes mobiles pour l'analyse de l'hydraulicité des cours d'eau sur la période d'observation.

Au niveau des stations Wajana, Kwé Est, Creek sud et Truu, le suivi limnimétrique a débuté en mai 2011. Les chroniques ne sont pas encore suffisamment longues pour rendre possible une analyse statistique.

5.2.2.1 Bassin versant de la Kwé

KWE PRINCIPALE A LA STATION KAL

Sur la Kwé à la station KAL, le module est de 2,26 m³/s sur la période 1996-2012. La Figure 17 présente l'évolution des débits moyens annuels pour cette période. Une moyenne mobile à 5 ans est également représentée sur cette figure, elle permet de déterminer les tendances à moyen terme avec les successions de périodes humides et sèches. Le début des enregistrements correspond à une période humide suivie d'une période sèche entre 2002 et 2006. Au cours de la période récente, les apports annuels de la Kwé à la station KAL connaissent un retour à une hydraulicité moyenne, c'est à dire proche du module.

Les années 2000 et 2008 sont particulièrement humides tandis que les années 1998 et 2005 sont particulièrement sèches. Les années 1997, 2007 et 2009 présentent une hydraulicité moyenne.

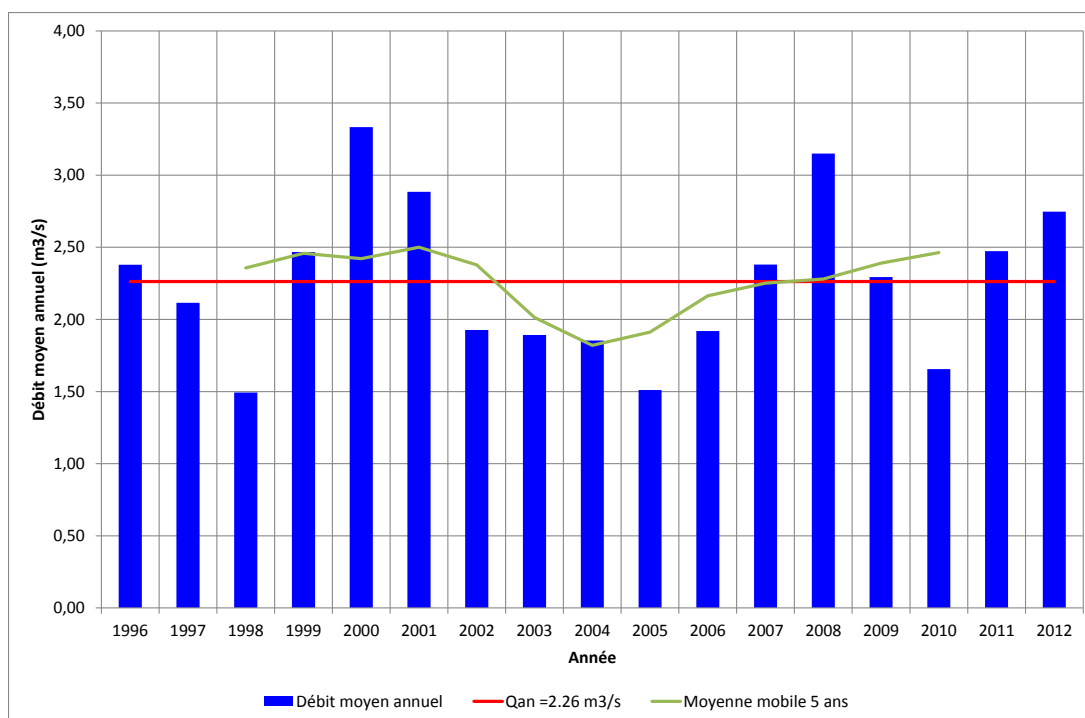


Figure 17 : Débits moyens annuels caractéristiques à la station KAL

KWE NORD A LA STATION KNL

Sur la Kwé Nord à la station KNL le module est de $0,86 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1996-2012. La Figure 18 présente l'évolution des débits moyens annuels sur cette période.

L'estimation des débits moyens annuels à KNL est limitée à 2008 en raison de la mise en eau du bassin de sédimentation de la Kwé Nord. A partir de cette date, cette station, rendue inopérante, a été remplacée par la station KN14, située en amont du bassin de sédimentation de la Kwé Nord (BSKN).

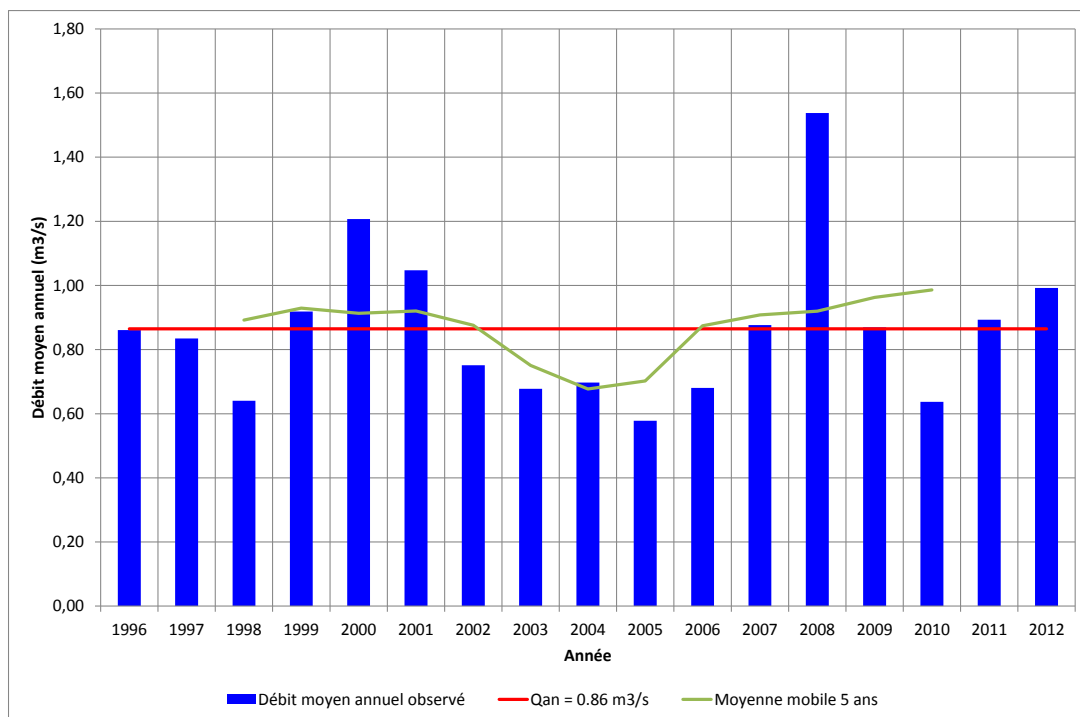


Figure 18 : Débits moyens annuels caractéristiques à la station KNL

Les données manquantes de la série relative à la station KNL ont été reconstituées par régression linéaire avec les apports à la station KAL. La moyenne mobile présente les mêmes tendances que celle de la station KAL, par contre l'année 2008 semble plus marquée comme une année humide que l'année 2000. Les années sèches sont les années 1998, 2005 et 2010.

KWE OUEST A LA STATION KOL

Sur la Kwé Ouest à la station KOL, le module est de 0,52 m³/s sur la période 1996-2012. La Figure 19 présente l'évolution des débits moyens annuels. La série de données ayant été complétée et étendue à l'aide des données de la station KNL, les mêmes tendances y sont constatées.

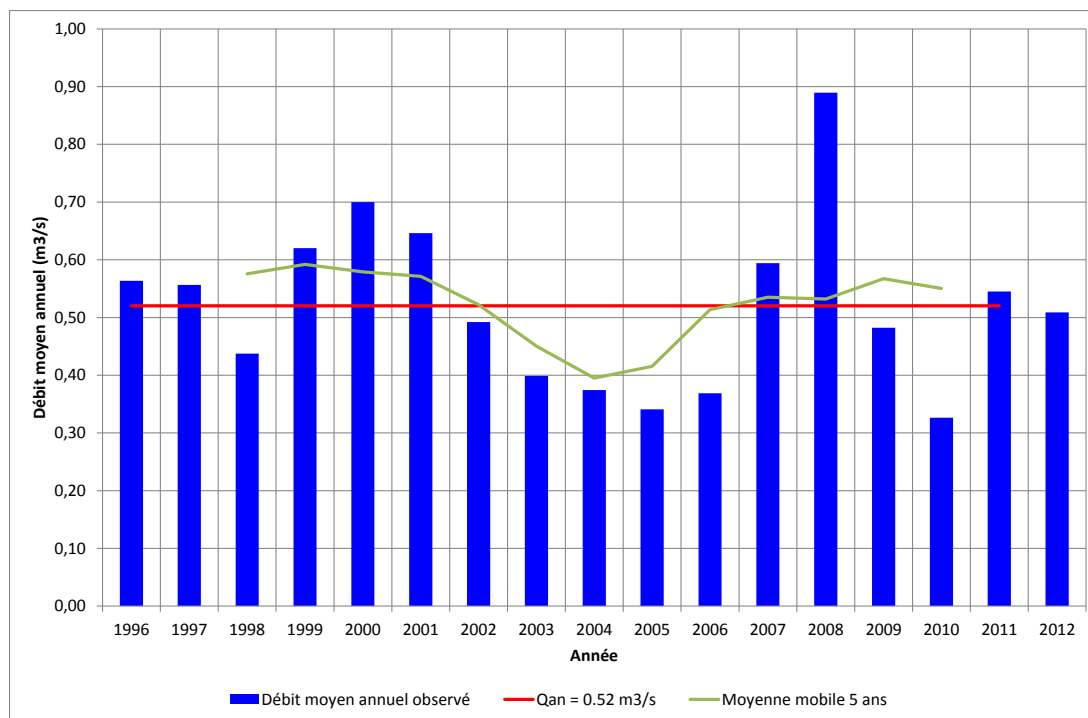


Figure 19 : Débits moyens annuels caractéristiques à la station KOL

5.2.2.2 Rivière des Lacs - station Le Goulet

Sur la rivière des lacs et au niveau de la station le Goulet (DAVAR), le module est de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1996-2010 alors qu'il est de $5,79 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1958-2010. La Figure 20 présente l'évolution des débits moyens annuels pour la période 1958-2010.

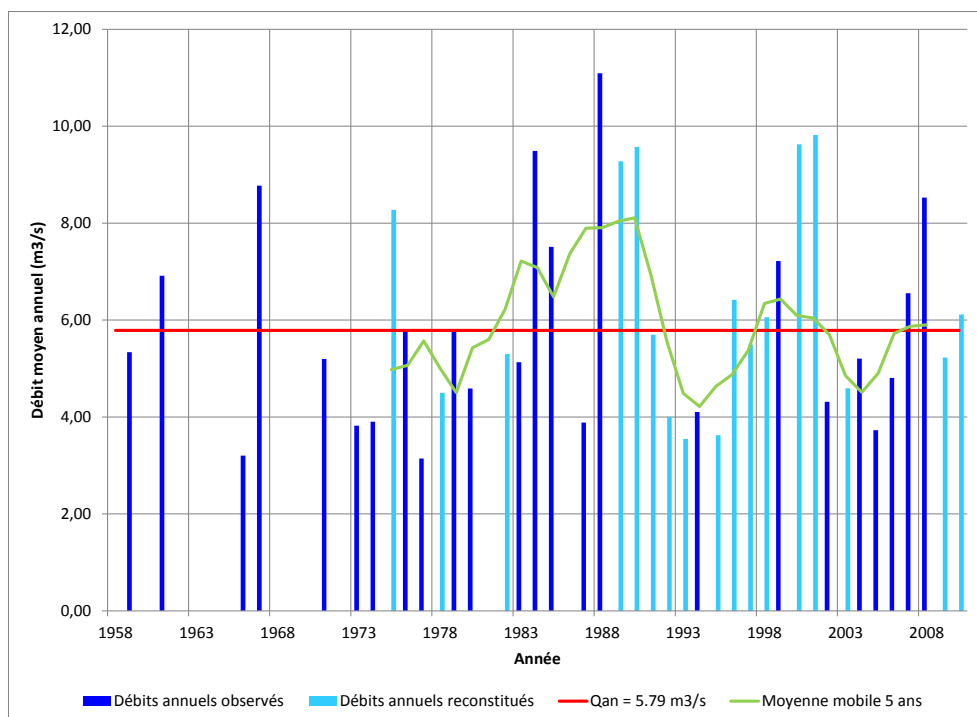


Figure 20 : Débits moyens annuels caractéristiques de la Rivière des Lacs, station Le Goulet (DAVAR)

La période 1958-1972 présentant de nombreuses lacunes, l'analyse de l'hydraulicité à moyen terme à l'aide de la moyenne mobile n'est réalisée qu'à partir de 1973. La rivière des Lacs a été caractérisée par une faible hydraulicité sur la période 1973–1983. S'ensuit une période très humide jusqu'en 1991. De 1992 à 1996, une période sèche est observée. Par la suite, la rivière des Lacs présente les mêmes tendances d'hydraulicité que le bassin de la Kwé (stations KAL et KNL).

5.2.2.3 Rivière Bleue - Embouchure

Sur la rivière Bleue à l'Embouchure (DAVAR), le module est de $1,93 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1996-2010 alors qu'il est de $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1973-2010. La Figure 21 présente l'évolution des débits moyens annuels pour la période 1973-2010. La rivière Bleue à l'Embouchure présente la même hydraulicité, avec les mêmes successions de périodes sèches et humides, que la rivière Bleue.

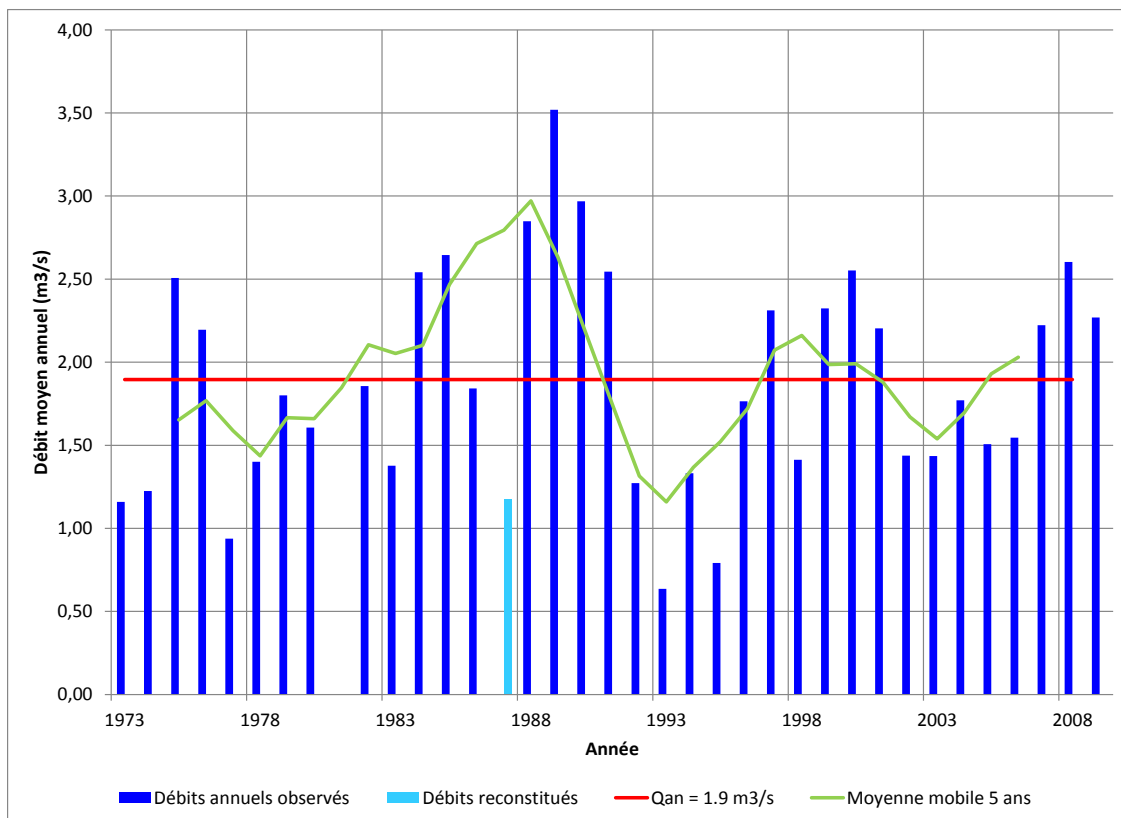


Figure 21 : Débits moyens annuels caractéristiques de la Rivière Bleue à l'embouchure

5.2.3 Débits moyens mensuels

L'analyse des débits mensuels permet d'étudier la variabilité saisonnière des écoulements. Les débits des rivières de Goro de même que des rivières à proximité du site évoluent suivant les variations saisonnières des précipitations et en suivant une tendance commune, visible sur les figures suivantes avec une augmentation progressive du débit moyen entre novembre et avril puis une diminution régulière jusqu'à la fin du mois d'octobre. Certaines rivières peuvent s'assécher au cours de la "saison sèche" (aux alentours de septembre) et inonder leurs rives au cours de la "saison des pluies" (février et mars).

Le Tableau 5 fournit les caractéristiques mensuelles de débits aux différentes stations de jaugeage, sur le site et à proximité. Plus précisément, il mentionne les valeurs mensuelles médianes (M), les valeurs décennales sèches (S10) et les valeurs décennales humides (H10) desdits débits. L'ensemble de ces caractéristiques a été calculé sur la période de référence 1996-2011. Les caractéristiques mensuelles des stations de la DAVAR ont été extraites du « Recueil des débits caractéristiques de la Nouvelle Calédonie » de la DAVAR de 2009 (ALRIC, 2009).

Tableau 5 : Caractéristiques des débits mensuels aux stations de jaugeage (m³/s)

		N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
KAL	Med	0,92	0,88	2,46	2,16	3,64	3,51	2,21	1,56	1,33	1,33	1,32	1,13
	S10	0,42	0,54	0,74	0,74	1,57	2,12	1,19	1,00	0,75	0,83	0,46	0,49
	H10	1,65	3,21	3,36	6,98	7,76	7,33	3,84	3,15	3,35	1,94	2,45	2,11
KNL	Med	0,35	0,50	0,94	0,77	1,29	1,22	0,93	0,60	0,59	0,55	0,48	0,40
	S10	0,20	0,22	0,36	0,36	0,67	0,87	0,49	0,47	0,36	0,34	0,27	0,21
	H10	0,56	1,08	1,36	2,80	2,33	2,93	1,46	1,13	1,39	0,83	1,03	0,95
KOL	Med	0,18	0,25	0,64	0,56	0,82	0,71	0,48	0,37	0,29	0,26	0,20	0,18
	S10	0,07	0,12	0,19	0,29	0,48	0,57	0,33	0,21	0,16	0,10	0,09	0,04
	H10	0,37	0,68	1,02	1,54	1,71	1,63	0,98	0,68	0,74	0,54	0,62	0,38
Rivière des Lacs	Med	2,07	2,45	5,20	7,8	9,70	8,19	4,52	3,9	3,09	2,86	1,66	1,25
	S10	0,61	0,46	1,39	2,29	3,37	2,98	1,77	2,24	1,3	0,95	0,66	0,52
	H10	9,54	8,99	17,59	16,94	22,21	18,87	10,63	9,72	5,77	6,39	4,53	3,48
Rivière Bleue	Med	0,57	0,84	1,57	2,36	3,46	2,65	1,93	1,38	0,86	0,95	0,52	0,40
	S10	0,18	0,25	0,28	0,53	1,38	1,04	0,66	0,62	0,41	0,35	0,25	0,21
	H10	1,29	3,36	4,03	7,98	7,86	5,26	3,26	3,1	2,27	2,16	1,63	1,13

Dans la suite de cette partie, les débits moyens mensuels caractéristiques sont illustrés sous forme graphique pour chaque station. Sur ces figures, les débits moyens mensuels de chaque année, les valeurs moyennes et médianes de débit mensuel ainsi que les valeurs S10 et H10 sont représentées.

La représentation des débits mensuels de chaque année permet d'appréhender la variabilité saisonnière des écoulements au cours de chaque mois.

Les valeurs moyennes mensuelles et les médianes permettent de voir l'influence de valeurs exceptionnelles sur la moyenne. En effet, la valeur médiane est un outil statistique plus robuste, elle représente la valeur qui se produit en moyenne une année sur deux alors que la valeur moyenne représente l'espérance mathématique de l'ensemble des valeurs observées, elle est donc influencée par les valeurs extrêmes.

La **valeur S10** représente le débit mensuel décennal sec permettant de caractériser une faible hydraulicité. On observe cette valeur en année sèche en moyenne une année sur dix. La **valeur H10** représente le débit mensuel décennal humide permettant de caractériser une forte hydraulicité. On observe cette valeur en année humide en moyenne une année sur dix. En d'autres termes, une période de 10 ans ne connaîtra statistiquement qu'une seule année avec un débit moyen inférieur ou égal à S10 et une seule année avec un débit moyen supérieur ou égal à H10.

5.2.3.1 Bassin versant de la Kwé

KWE PRINCIPALE A LA STATION KAL

La Figure 22 présente les débits moyens mensuels (moyenne des débits journaliers sur un mois) de chaque année à la station KAL, ainsi que les valeurs moyennes et médianes et les débits S10 et H10.

La station KAL est caractérisée par un fort débit moyen mensuel entre mars et avril. Les mois les plus secs sont octobre et novembre. Les plus fortes irrégularités sont observées entre novembre et mars, au cours de la saison humide. Au cours de cette période, les coefficients d'irrégularité (coefficient H10/S10) sont supérieurs à 4, avec un pic en février au cours duquel ce ratio excède 10, traduisant ainsi une grande irrégularité d'une année sur l'autre. Sur les autres mois de l'année, excepté le mois de juillet, l'amplitude entre les valeurs décennales sèches et humides est moins prononcée, le débit moyen s'avérant plus régulier d'une année sur l'autre. Des pics annuels de crue observés en juillet permettent d'expliquer ce regain d'irrégularité.

Les différences entre les valeurs moyennes et médianes sont les plus prononcées pendant les mois durant lesquels les apports mensuels présentent le plus d'irrégularités. La comparaison des médianes des débits moyens mensuels entre la station KAL et les stations jaugées voisines de référence de la Rivière des Lacs et de Rivière Bleue indique la même tendance, à savoir une augmentation progressive du débit moyen entre novembre et avril puis une diminution régulière jusqu'à la fin du mois d'octobre.

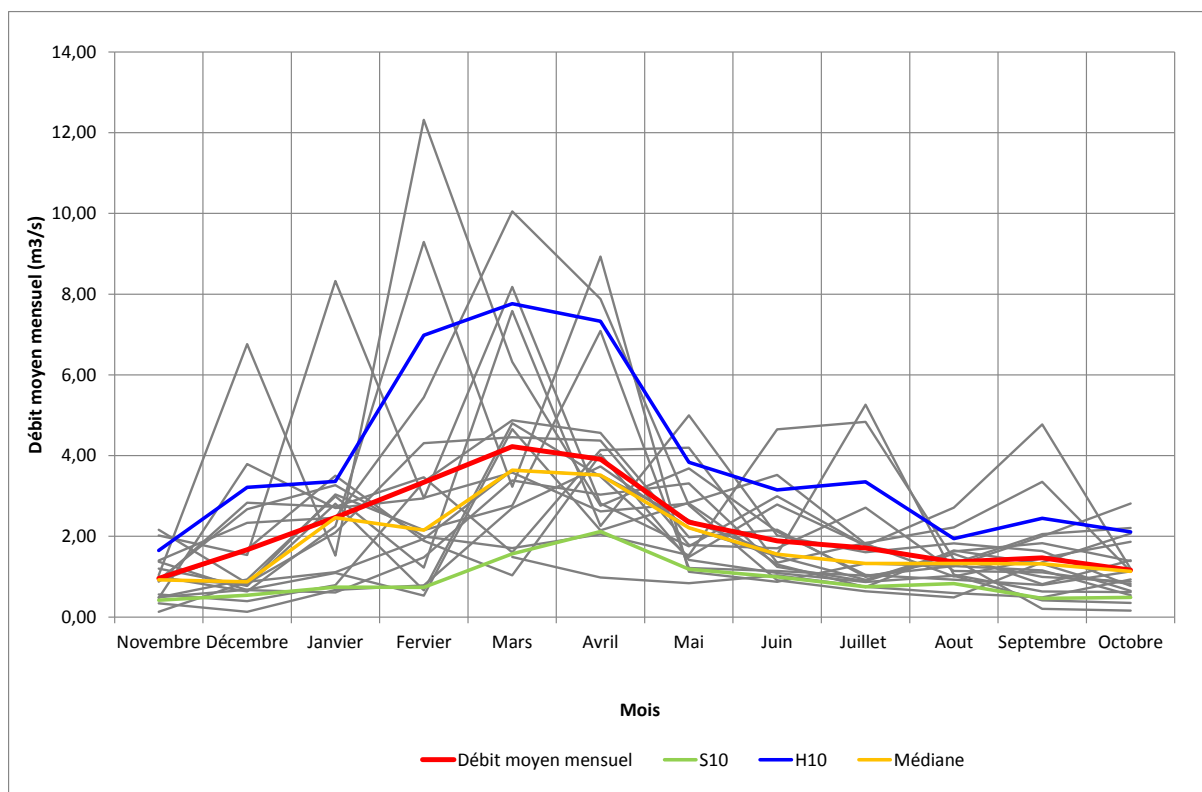


Figure 22 : Débits moyens mensuels caractéristiques de la Kwé Principale à la station KAL

KWE NORD A LA STATION KNL

La Figure 23 présente les débits moyens mensuels (moyenne des débits journaliers sur un mois) de chaque année à la station KNL, les valeurs moyennes et médianes des débits mensuels, ainsi que les valeurs S10 et H10.

La station KNL est caractérisée par un fort débit moyen mensuel entre mars et avril. Les mois les plus secs sont les mois d'octobre et novembre. L'irrégularité des écoulements mensuels d'une année à l'autre est présente une amplitude moindre à cette station qu'au niveau de la station KAL. En effet, les ratios entre décennales humides et sèches excèdent la valeur de 4 au cours des mois de décembre, février et juillet seulement. Au cours des autres mois, ce coefficient est relativement faible, traduisant une bonne régularité du débit moyen d'une année sur l'autre. C'est d'ailleurs en février et en juillet que les valeurs moyennes et médianes mensuelles diffèrent le plus.

La comparaison des médianes des débits moyens mensuels entre la station KNL et la station voisine de référence de la Rivière des Lacs confirme la même tendance : une augmentation progressive du débit moyen entre novembre et mars-avril puis une diminution régulière jusqu'à la fin du mois d'octobre.

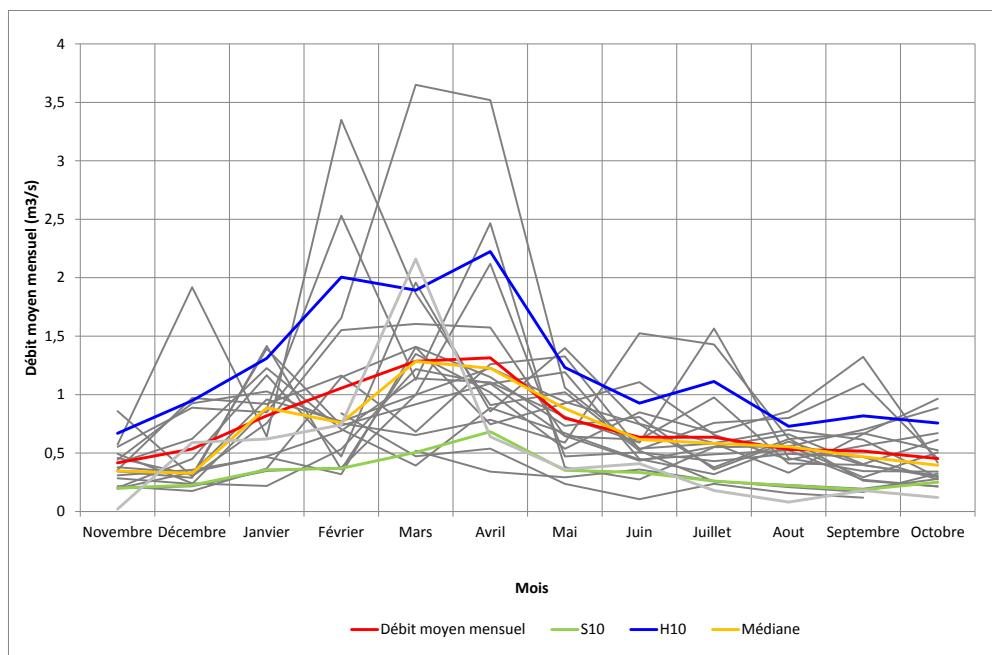


Figure 23 : Débits moyens mensuels caractéristiques de la Kwé Nord à la station KNL

KWE OUEST A LA STATION KOL

La Figure 24 présente les débits moyens mensuels (moyenne des débits journaliers sur un mois) de chaque année à la station KOL, les valeurs moyennes et médianes des débits mensuels, ainsi que les valeurs S10 et H10.

La station KOL est caractérisée par un fort débit moyen mensuel entre mars et avril. Le mois le plus sec est le mois d'octobre. L'irrégularité des écoulements est prononcée (avec un ratio H10/S10 > 4) pendant les mois de décembre, janvier, février, juillet et septembre-octobre. Sur les autres mois de l'année, ces ratios sont sensiblement plus faibles, le débit moyen étant plus régulier sur cette période d'une année sur l'autre.

Les valeurs moyenne et médiane sont assez contrastées chaque mois de l'année à cette station. Les particularités hydrogéologiques de ce bassin pourraient expliquer cette forte variabilité. La comparaison des médianes des débits moyens mensuels avec ceux de la station voisine de référence de la Rivière des Lacs confirme la même tendance: une augmentation progressive du débit moyen entre novembre et mars-avril puis une diminution régulière jusqu'à la fin du mois d'octobre.

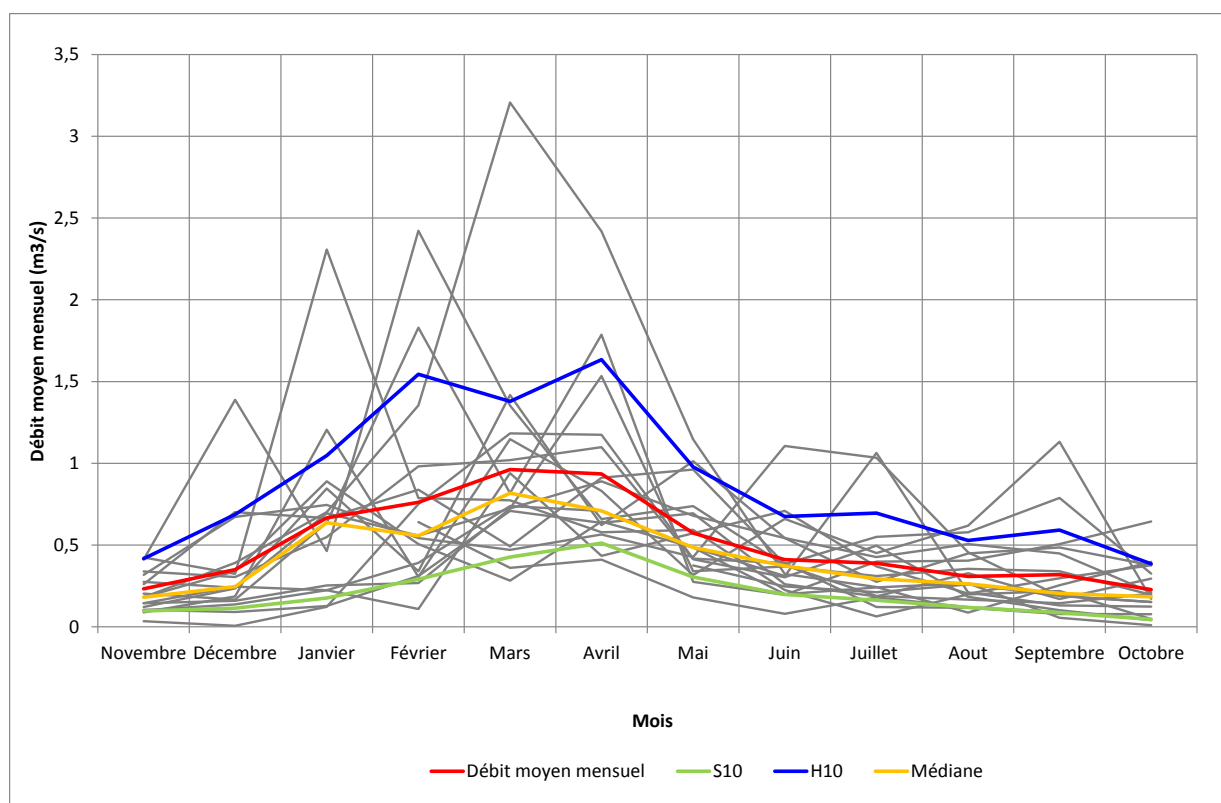


Figure 24 : Débits moyens mensuels caractéristiques de la Kwé Ouest à la station KOL

5.2.3.2 Rivière des Lacs - Le Goulet

La Figure 25 présente les moyennes et les médianes des apports mensuels de la Rivière des Lacs à la station Le Goulet (DAVAR), ainsi que les débits S10 et H10. On y voit les débits caractéristiques de l'ensemble de la période ainsi que les valeurs référence de la DAVAR. On remarque que, pour les valeurs S10 et H10, les écarts sont faibles entre les valeurs référence de la DAVAR et les caractéristiques obtenues à partir de l'ensemble de la période d'observation.

Le pic d'apport mensuel est observé en mars tandis que c'est le mois d'octobre qui est le plus sec. Le rapport entre les valeurs décennales sèches et humides est supérieur à 4 tout au long de l'année, les valeurs les plus élevées étant observées entre novembre et mars. Le coefficient d'irrégularité est assez élevé pour les mois de février, septembre, octobre, novembre et décembre, traduisant une certaine irrégularité du débit moyen d'une année sur l'autre.

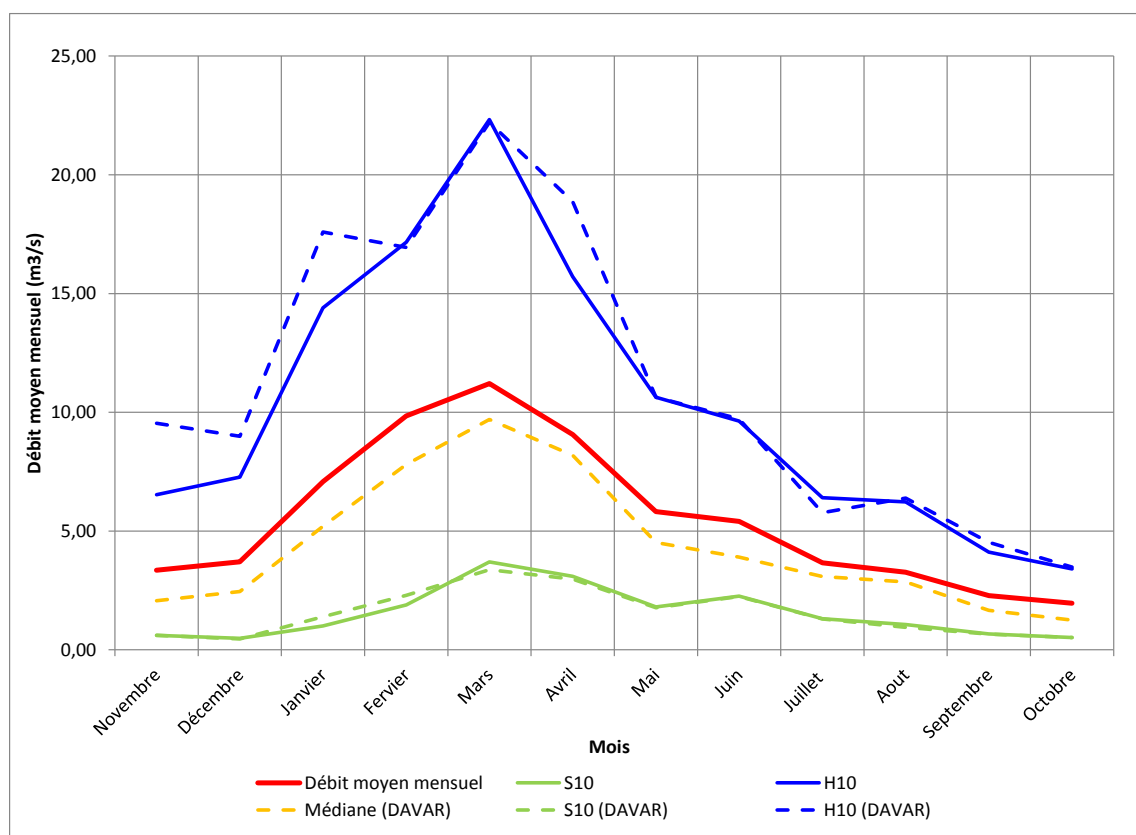


Figure 25 : Débits moyens mensuels caractéristiques de la Rivière des Lacs, station Le Goulet

5.2.3.3 Rivière Bleue - Embouchure

La Figure 26 présente les moyennes et les médianes des apports mensuels de la Rivière Bleue à l'Embouchure (station DAVAR), ainsi que les débits S10 et H10. Les débits caractéristiques de l'ensemble de la période d'observation y sont représentés (traits pleins), ainsi que les valeurs référence de la DAVAR (traits pointillés). Les écarts sont modérés à faibles entre les valeurs référence de la DAVAR et les caractéristiques obtenues à partir de l'ensemble de la période d'observation pour les caractéristiques de débit décennales humides. Les écarts sont plus importants pour les caractéristiques décennales sèches.

Le pic d'apport mensuel est observé en mars à cette station tandis que ce sont les mois d'octobre et de novembre qui sont les plus secs. Les ratios entre les décennales sèches et humides sont nettement plus forts entre septembre et février. Sur la période de référence de la DAVAR, les coefficients d'irrégularité sont élevés (>5) tout au long de l'année. Cette différence s'explique par les caractéristiques des décennales sèches plus drastiques sur la période de référence utilisée par la DAVAR.

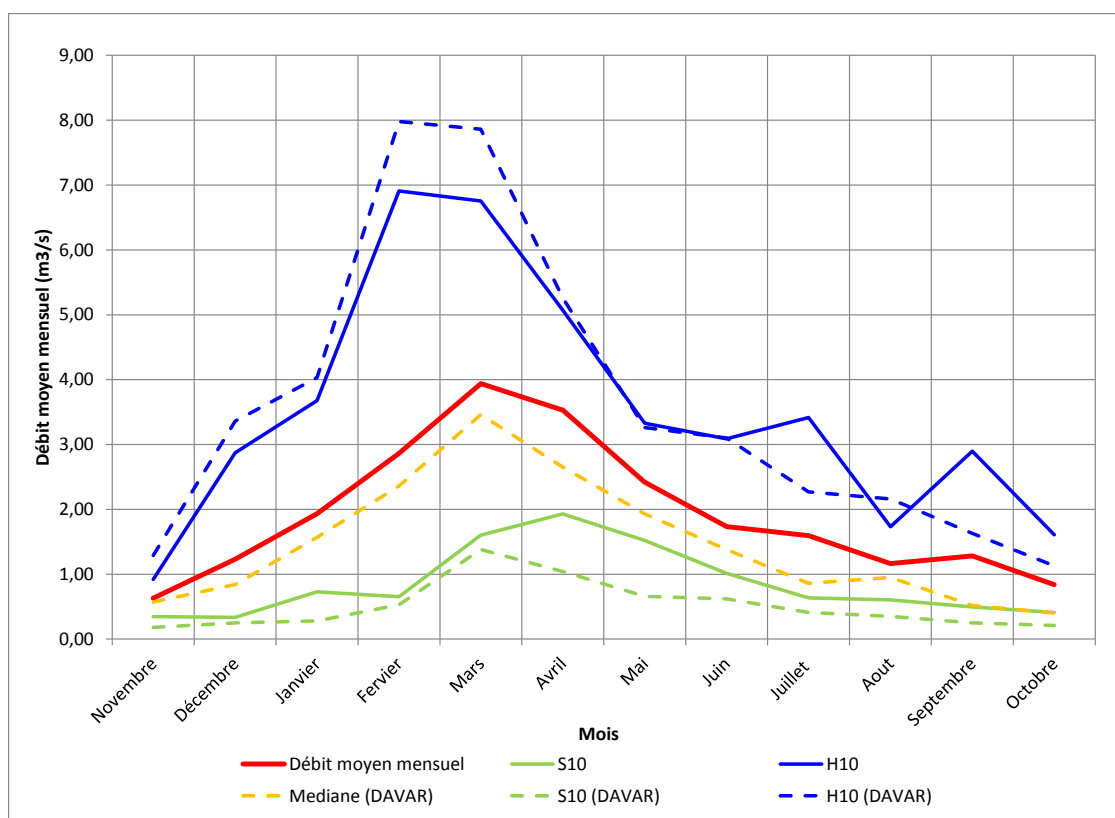


Figure 26 : Débits moyens mensuels caractéristiques de la Rivière Bleue à l'embouchure

5.2.4 Débits journaliers et débits extrêmes

La variabilité des débits journaliers peut être décrite à partir :

- des chroniques de débits journaliers et des courbes de débits classés ;
- de l'analyse statistique des débits extrêmes avec l'étude des crues en période de hautes eaux et l'étude des étiages en période de basses eaux.

Les données de débit journalier à la station KOL observés sur une période courte et présentant de nombreuses lacunes ne sont pas présentées dans cette partie.

5.2.4.1 Variabilité journalière des débits

Les figures suivantes permettent une visualisation synthétique de la variabilité journalière des débits aux stations KAL et KNL. Sont représentées les chroniques de débits journaliers observés et/ou reconstitués ainsi que les courbes de débits classés de ces mêmes débits journaliers.

Les courbes de débits classés présentent les débits journaliers observés aux stations de mesure sur l'ensemble de la période. Les débits journaliers, classés par valeurs croissantes, sont associés à leur probabilité de non dépassement.

Le Tableau 6 présente les classes de débits journaliers aux stations KAL et KNL par ordre croissant et les fréquences empiriques de non dépassement associées.

On sait que le module de la station KAL ($2,26 \text{ m}^3/\text{s}$) est dépassé en moyenne 25 % du temps dans l'année (ou non dépassé 75 % du temps) et le module de la station KNL ($0,86 \text{ m}^3/\text{s}$) est dépassé en moyenne 25 % du temps (ou non dépassé 75 % du temps). Ces caractéristiques montrent que le débit moyen interannuel (module) de la Kwé et de ses affluents est fortement influencé par les crues.

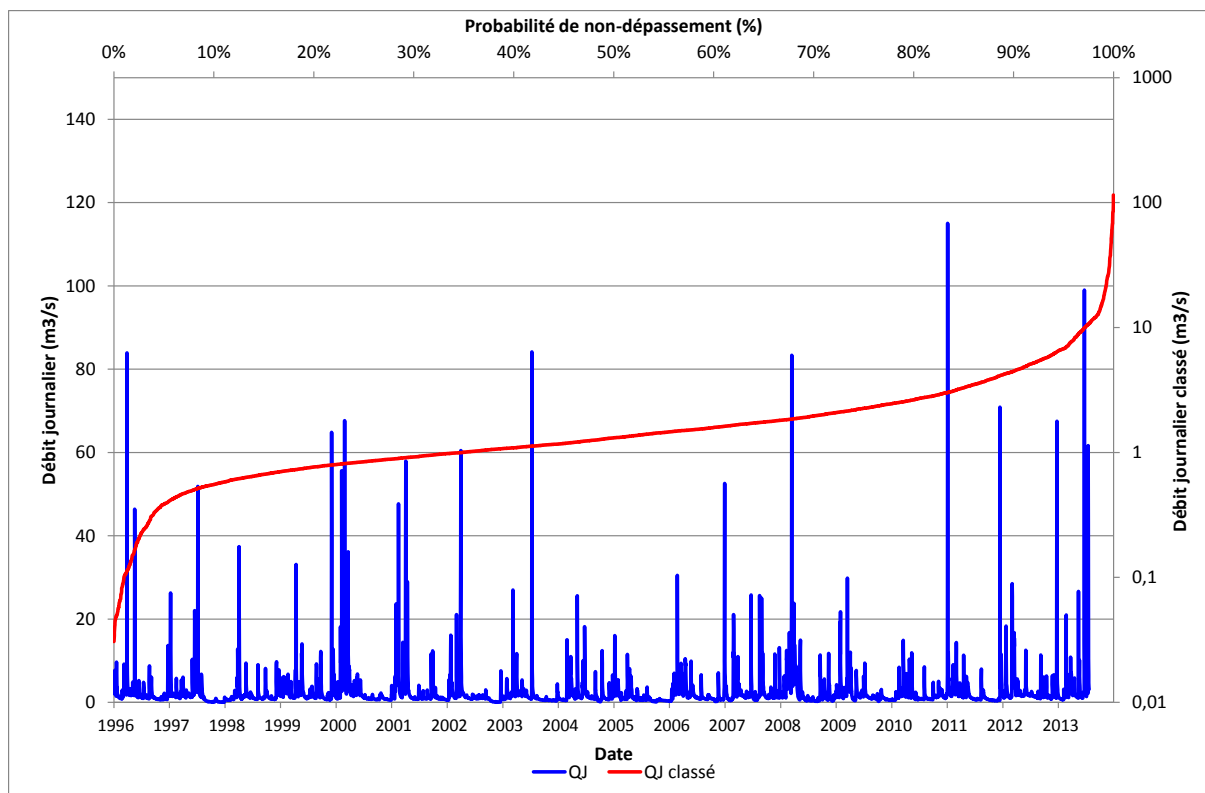


Figure 27 : Variabilité journalière des débits de la Kwé Principale, station KAL

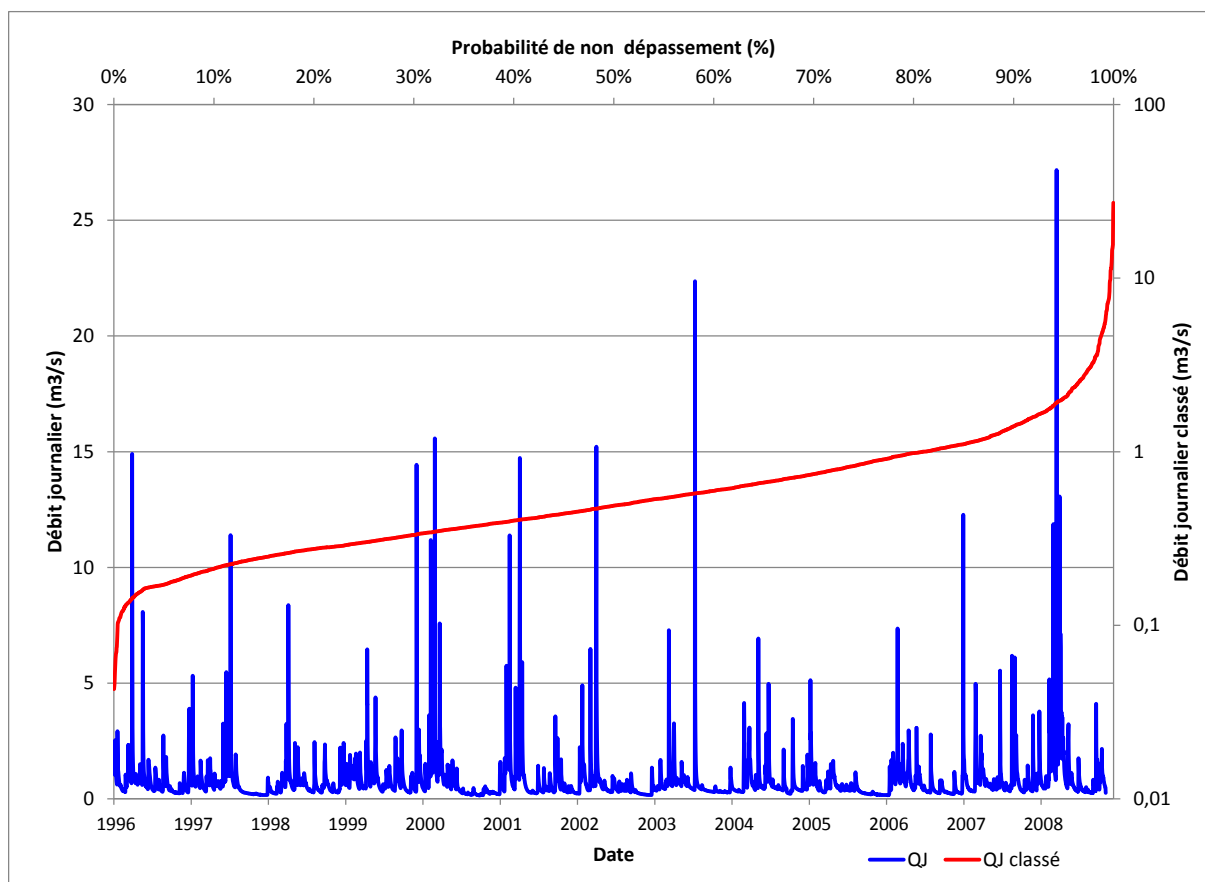


Figure 28 : Variabilité journalière des débits de la Kwé Nord, station KNL

Tableau 6 : Caractéristiques de débit classé aux stations KAL et KNL

Probabilité de non-dépassement	Débits journaliers à la Station KAL (m ³ /s)	Débits journaliers à la Station KNL (m ³ /s)
10 %	0,55	0,21
20 %	0,77	0,28
30 %	0,92	0,33
40 %	1,09	0,40
50 %	1,31	0,49
60 %	1,59	0,60
70 %	1,96	0,74
80 %	2,64	0,98
90 %	4,47	1,40

5.2.4.2 Analyse des crues

La saison la plus propice aux crues en Nouvelle-Calédonie est la saison chaude et humide de novembre à avril. Néanmoins des crues peuvent survenir également au cours des saisons de transition.

CONSTITUTION D'UN ECHANTILLON DE CRUE SUR LE SITE DE GORO ET SES ALENTOURS

Le Tableau 7 renseigne sur les débits de crues aux stations KAL, KNL et KOL sur la zone d'étude et aux stations de la Rivière des Lacs et de la Rivière Bleue au voisinage de la zone d'étude. Il recense, sur la période 1996-2013, les valeurs de débits maximaux journaliers (QJMax) et les débits de pointe (QIX) enregistrés au niveau de chaque station. On constate que la plupart des crues sont concomitantes pour l'ensemble des stations, sauf peut-être au niveau de la station Rivière Bleue qui présente des occurrences de crue différentes. Ceci montre une bonne homogénéité régionale des évènements majeurs.

Seul le cyclone Beti du 27 au 28 mars 1996 a engendré une crue sur l'ensemble des cours d'eau de la zone d'étude et de ses alentours, le 27 mars 1996. Le cyclone Vania du 11 au 16 janvier 2011 a engendré une crue au niveau des stations KAL et KNL le 14 janvier 2011, troisième plus forte crue enregistrée à cette station. Les autres cyclones et dépressions tropicales répertoriés dans le chapitre de la Climatologie n'ont pas engendré la crue maximale annuelle au niveau des stations de jaugeage.

La Figure 29 présente les valeurs de débits de pointe enregistrées sur le bassin versant de la Kwé. Il n'a pas été possible d'y représenter les débits de pointe régionaux car les données n'étaient pas disponibles au moment de l'analyse, néanmoins, d'après le Tableau 7, on observe une concomitance de crues maximales annuelles au niveau régional. Ceci démontre l'intérêt de développer des études régionales de crues pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques du projet de Goro. Une intégration des données régionales permettra, en effet, l'extension des échantillons de crue sur le bassin de la Kwé afin de rendre les valeurs statistiques de quantiles de crue plus robustes.

Les données de la Kwé Ouest semblent très peu significatives au vu des données des autres stations qui suivent les mêmes tendances, les quantiles de crues à la station KOL ne seront donc pas estimés par analyse fréquentielle.

Tableau 7 : Débits de crues aux différentes stations de jaugeage (m³/s)

Station KAL			Station KNL			Station KOL			Rivière des Lacs		Rivière Bleue	
Date	QJMax	QIX	Date	QJMax	QIX	Date	QJMax	QIX	Date	QJMax	Date	QJMax
27/03/1996	83,93	217,19	27/03/1996	20,13	47,501				27/03/1996	285,24	27/03/1996	72,16
07/07/1997	51,87	131,02	16/06/1997	7,54	45,854				07/07/1997	108,50	08/01/1997	29,15
05/04/1998	37,41	89,56	05/04/1998	11,65	29,764				20/05/1998	30,52	1998	-
15/04/1999	33,1	116,35	15/04/1999	8,79	30,797				16/04/1999	48,44	15/04/1999	35,17
29/02/2000	67,65	267,37	29/02/2000	21,09	69,367				29/02/2000	154,35	29/02/2000	54,78
07/04/2001	57,95	93,63	18/02/2001	15,34	33,704				2001	-	18/04/2001	57,22
04/04/2002	60,45	139	04/04/2002	20,51	45,688				04/04/2002	89,07	07/03/2002	24,93
16/07/2003	84,17	329,84	16/07/2003	23,49	-				16/07/2003	174,31	16/07/2003	38,74
11/05/2004	25,62	63,5	11/05/2004	7,15	-				11/05/2004	68,91	28/06/2004	21,36
12/01/2005	16,02	-	12/01/2005	7,25	16,138				12/01/2005	45,36	06/04/2005	18,5
01/03/2006	30,49	62,12	01/03/2006	10,3	22,727	01/03/2006	7,99	19,73	01/03/2006	65,55	21/04/2006	20,46
25/08/2007	25,66	92,7	06/01/2007	16,8	48,071				29/06/2007	67,37	25/08/2007	33,91
23/03/2008	83,37	195,93	23/03/2008	37,27	85,16	23/03/2008	24,06	102,2	23/03/2008	231,38	23/03/2008	39,22
25/03/2009	29,83	53,54	25/03/2009		-	25/03/2009	6,32	11,56	07/02/2009	41,89	24/03/2009	17,32
28/03/2010	14,91	55,28	28/03/2010		-	28/03/2010	3,12	-	29/03/2010	35,22	27/03/2010	19,92
14/01/2011	115,21	293,94	14/01/2011	28,12	75,902	14/01/2011	41,38	125,04				
14/03/2012	24,05	116,328	11/06/2012	2,14	25,975	13/03/2012	10,21	57,47				
03/07/2013	98,99	327,68	03/07/2013	30,33	80,824							

Sur la Figure 29, on constate que 2 épisodes de type cyclonique ont généré des crues maximales annuelles sur le bassin versant de la Kwé. Ces valeurs ne représentent pas pour autant les événements ayant généré les plus fortes crues, le cyclone Vania restant le troisième débit le plus fort observé à la station KAL de même qu'à la station KNL. Les deux événements majeurs enregistrés à la station KAL ont été observés en juillet (2003 et 2013).

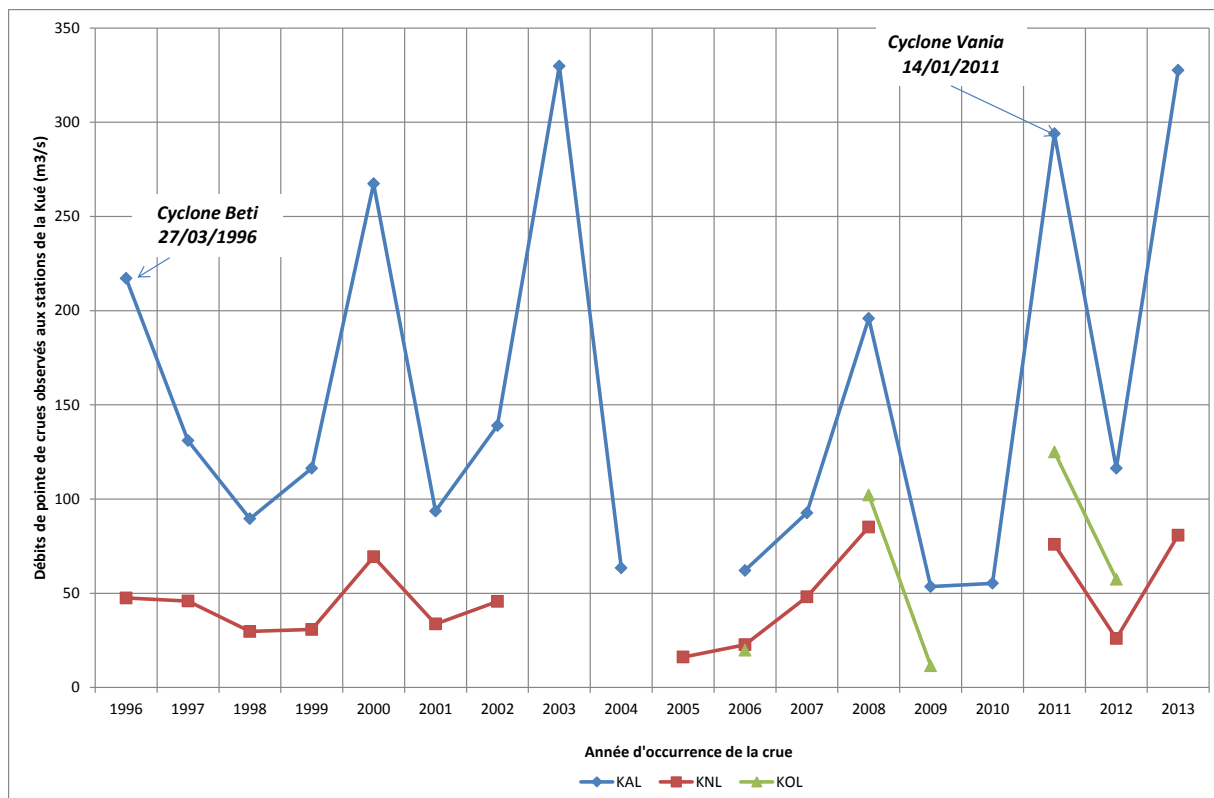


Figure 29 : Débits de pointe de crue observés sur le bassin de la Kwé

La Figure 30 illustre la saisonnalité des crues à la station KAL en fonction du nombre de crues intervenues chaque mois de l'année (nombre d'occurrence mensuelle) et de leur intensité (la moyenne des débits de pointe QIX pour chaque mois où une crue s'est produite). D'après cette figure, on constate que la plupart des crues se produisent en mars ou avril avec respectivement 6 et 4 crues produites au cours de ces mois sur 18 au total. Elles peuvent toutefois se produire sur une saison beaucoup plus longue. A la station KAL, des crues se sont produites tout au long de la période allant de janvier à août (sauf juin).

Du point de vue de l'intensité, ce sont les mois de janvier, février et juillet qui présentent les plus fortes crues. Les plus forts débits de pointe observés à la station KAL se sont produits en juillet.

La station KNL présente la même saisonnalité des crues que la station KAL, la plus forte crue ayant été observée au droit de cette station en mars 2008. Il est à noter qu'une crue d'une valeur de 120 m³/s y a été enregistrée le 27 septembre 2008. Même si la pluviométrie au site et à son voisinage indique de forts épisodes pluvieux entre le 26 et 28 septembre 2008 cette valeur n'a pas été conservée dans l'échantillon de crues, principalement pour trois raisons. D'une part, le bassin de sédimentation de la Kwé Nord (BSKN) était à la fin de sa période de construction, avant la première mise en eau. Cette valeur de crue peut correspondre à une opération de fin de travaux avant la mise en eau. D'autre part, si cette valeur était intégrée dans l'échantillon de crue, elle apparaîtrait tel un "horsain" (ie. valeur aberrante). Enfin, même si une crue était possible en septembre, elle reste peu probable.

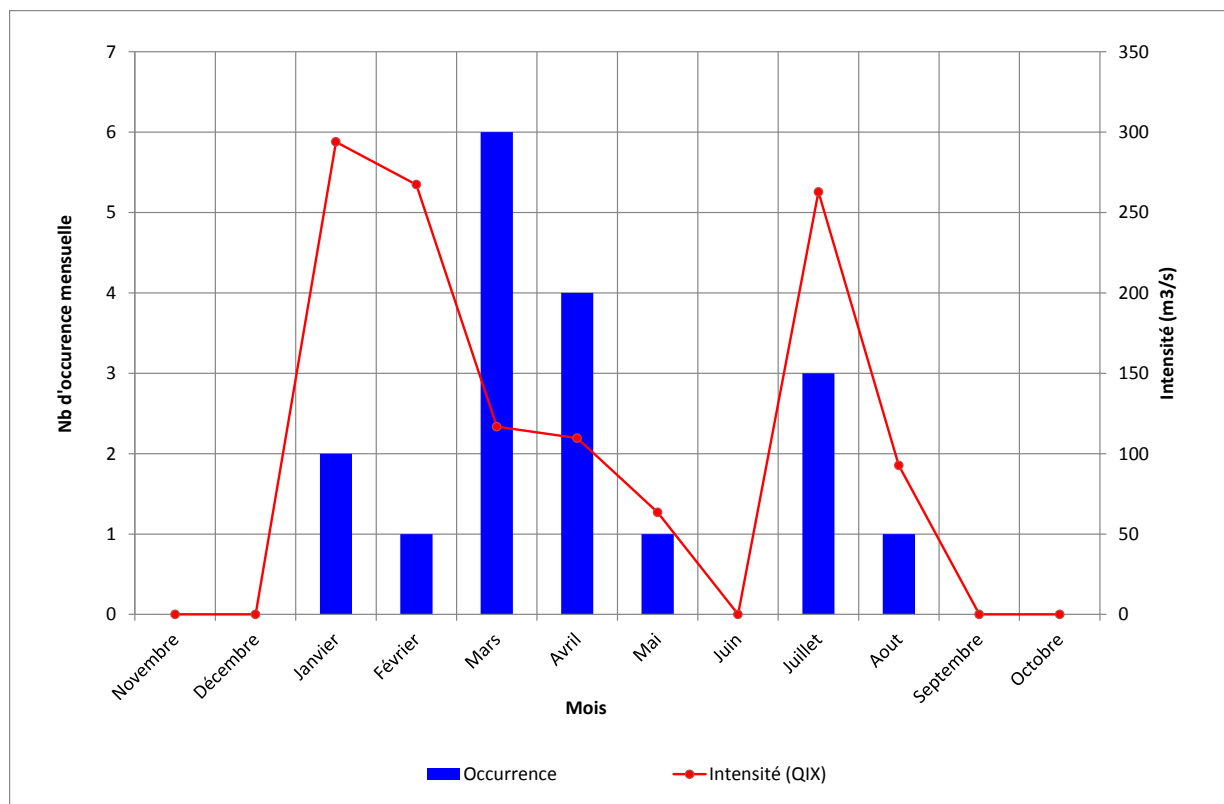


Figure 30 : Saisonnalité et intensité des crues à la station KAL

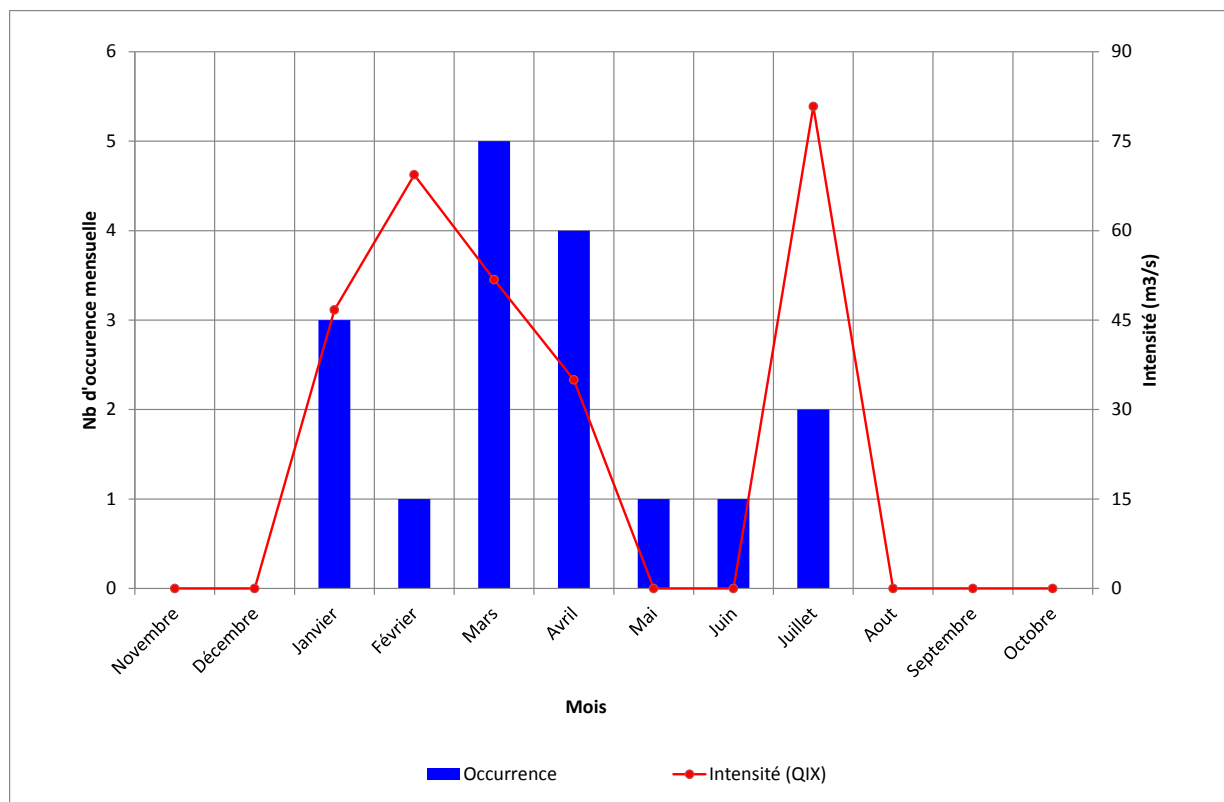


Figure 31 : Saisonnalité et intensité des crues à la station KNL

CALCUL DES DEBITS DE POINTE DE CRUE PAR ANALYSE FREQUENTIELLE

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir la probabilité d'apparition future. On utilise les distributions statistiques pour décrire un échantillon à l'aide d'un ajustement de fonction, qui permet d'estimer la valeur des crues rares et non encore estimées. L'ajustement statistique des valeurs de débits maximums observés est effectué aux stations KAL et KNL.

Le modèle fréquentiel utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes de débits est la distribution statistique de Gumbel. La fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right), \text{ avec } u = \frac{x-a}{b}$$

Les coefficients a et b sont les paramètres de la loi de Gumbel.

La démarche d'ajustement statistique est la suivante :

- la série des valeurs est triée par ordre croissant ;
- on attribue à chaque valeur une fréquence empirique (par la méthode de Hazen) correspondant à une probabilité de non-dépassement :

$$F = \frac{r-0.5}{n}, \text{ où } r \text{ est le rang dans la série de données et } n \text{ est la taille de l'échantillon ;}$$

- on calcule la variable de Gumbel par la formule : $u = -LN(-LN(F(x)))$;
- on représente le graphique des couples (u, Qmax) de la série à ajuster.

Les résultats de l'ajustement et de l'analyse fréquentielle des débits de pointe et des débits maximaux journaliers observés sont présentés à la Figure 32 pour la station KAL et à la Figure 33 pour la station KNL. Pour chacune de ces deux stations, les intervalles de confiance à 95 % des estimations sont également représentés.

Les crues observées aux deux stations semblent être en adéquation avec les lois de Gumbel modélisées pour chacun des paramètres.

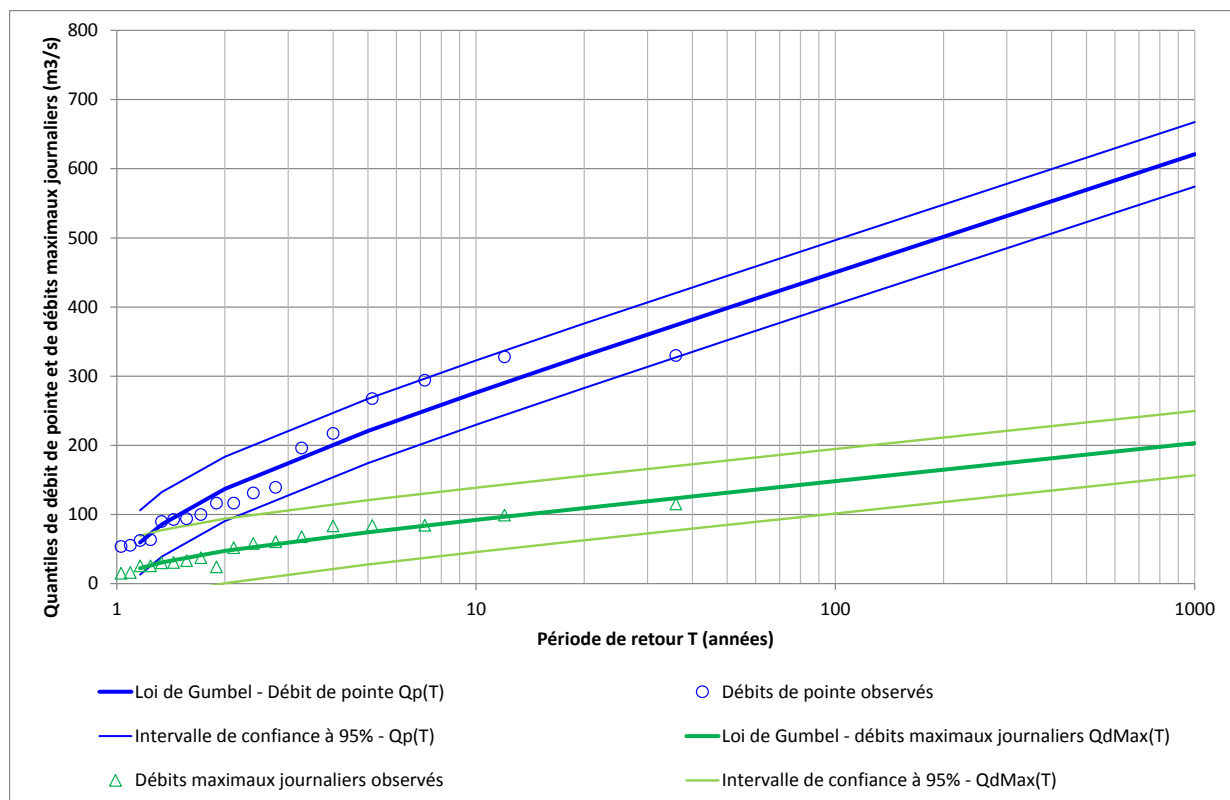


Figure 32 : Analyse fréquentielle des débits de crues à la station KAL

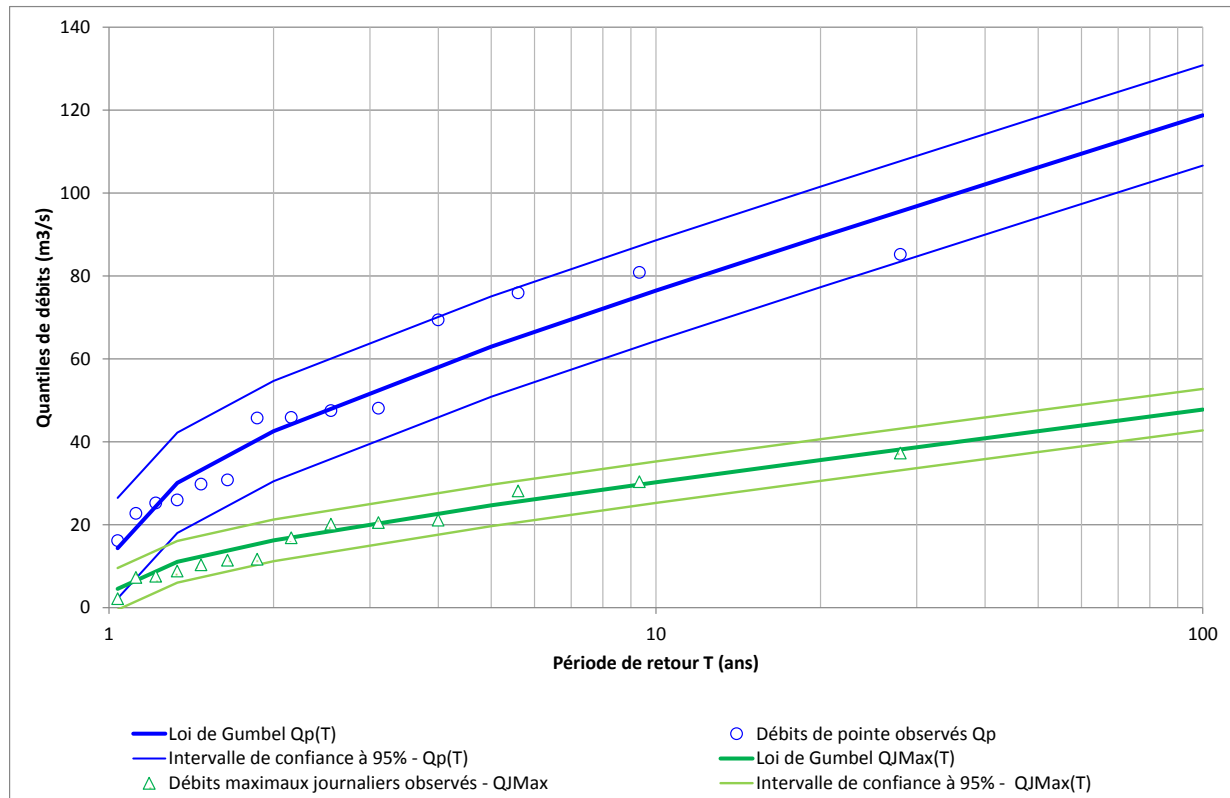


Figure 33 : Analyse fréquentielle des débits de crue à la station KNL

Le Tableau 8 fournit les résultats d'ajustement des crues aux différentes stations de jaugeage considérées dans cette analyse. Une analyse fréquentielle a été réalisée sur les échantillons de débit de pointe à chaque station de jaugeage. Ils ont été ajustés à une loi de Gumbel pour obtenir les quantiles de pointe $Q(T)$. Les débits de pointe des stations régionales de la Rivière des Lacs et la Rivière Bleue ont été extraits (et extrapolés à la période de retour 1 000 ans) du « Recueil des débits caractéristiques de la Nouvelle-Calédonie » de la DAVAR (ALRIC, 2009).

Ce tableau recense les quantiles de débits de pointe $Q(T)$ pour des périodes de retour allant de 2 à 1 000 ans ainsi que les coefficients de Francou Rodier KFR correspondants. Les paramètres de lois de Gumbel d'ajustement des débits de pointe y sont également reportés.

Le coefficient de Francou Rodier KFR est un index de sévérité des crues exprimant l'importance d'une crue sous forme d'un nombre indépendant de la taille du bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux qu'ils soient petits ou grands. On le note :

$$K_{FR} = 10 \times \left[1 - \frac{\ln(Q/10^6)}{\ln(A/10^8)} \right]$$

avec Q le débit de pointe de la crue (m^3/s) et A la superficie du bassin versant (km^2).

Le volet C du Livret D permet de situer ces coefficients dans le contexte hydrologique calédonien, propice aux fortes crues. Dans le Tableau 8, on note que les crues de la station KAL sont à peu près du même ordre de grandeur (ou légèrement inférieures pour les plus fortes crues) que celles de la station Rivière des Lacs. La station KNL présente, en revanche, de faibles débits de crue au regard des stations jaugeées par la DAVAR et de la station KAL.

Tableau 8 : Valeurs caractéristiques de crue aux stations de jaugeage

	KAL		KNL		Rivière des Lacs		Rivière Bleue	
T	Q(T)	K _{FR}	Q(T)	K _{FR}	Q(T)	K _{FR}	Q(T)	K _{FR}
2	137	4,04	43	3,53	204	3,96	85	3,72
5	221	4,36	63	3,85	369	4,38	147	4,08
10	276	4,51	76	4,00	479	4,57	189	4,25
20	330	4,63	89	4,11	584	4,71	228	4,38
50	398	4,76	106	4,23	720	4,86	280	4,52
100	450	4,84	119	4,31	822	4,95	318	4,60
1000	621	5,05	160	4,52	1158	5,20	445	4,83
Paramètre d'ajustement des lois de Gumbel								
Y ₀	110		36		150		65	
G	74		18		146		65	

Afin de vérifier la pertinence des ajustements, les résultats sont comparés aux estimations de crue centennale (période de retour 100 ans) obtenues à l'aide d'un modèle empirique régional établi par la DAVAR. En effet, sur le territoire calédonien, la DAVAR propose une méthode de calcul des débits de pointe pour les sites non jaugeés. Cette méthode est basée sur une relation empirique entre la surface du bassin versant et le débit de pointe. Cette relation est déduite à partir d'un ajustement statistique sur 22 bassins versants pour lesquels la DAVAR dispose de plus de 10 années de données ininterrompues. Les courbes enveloppes proposées sont représentées sur la Figure 34, c'est la loi proposée pour le secteur Sud qui nous intéresse ici.

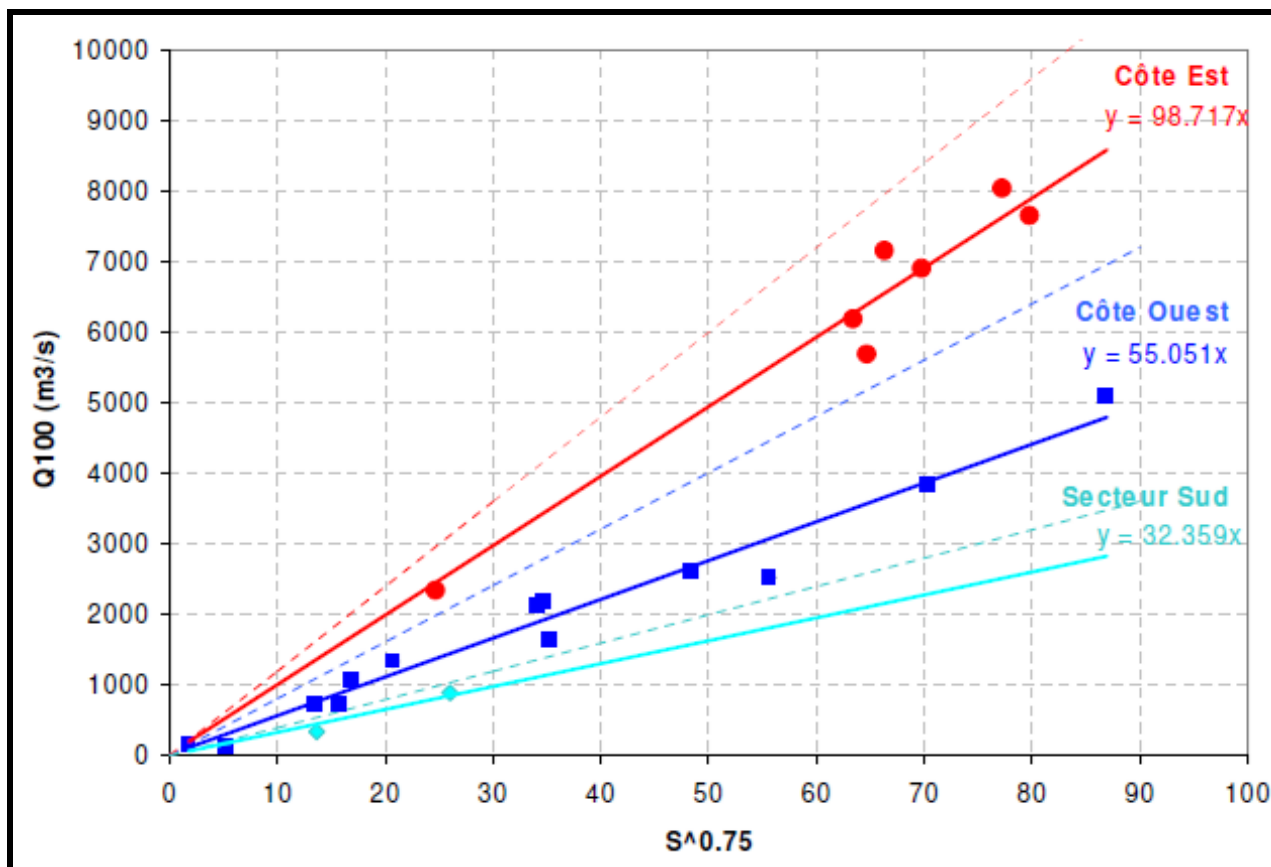


Figure 34 : Courbes enveloppes d'estimation des débits de pointe centennaux (DAVAR)

Les débits caractéristiques de crue pour des périodes de retour inférieures à la centennale peuvent se déduire grâce à un coefficient de proportionnalité (exemple : $Q_{10}=Q_{100}/1.81$). Le Tableau 9 fournit les estimations de débits de pointe pour les périodes de retour 10 et 100 ans aux différentes stations de jaugeage étudiées dans ce chapitre.

Au vu des résultats, on constate que les estimations à la station KAL montrent une assez bonne homogénéité avec les estimations déduites de l'analyse fréquentielle. En revanche, de fortes différences sont constatées à la station KNL.

Tableau 9 : Estimation des débits de pointe aux stations de jaugeage par méthode DAVAR

Période de retour T (années)	Quantiles de débits de pointe (m³/s)				
	KAL	KNL	KOL	Rivière des Lacs	Rivière Bleue
10	246	103	115	465	248
100	445	187	208	841	449

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences. D'une part, la période d'observation des débits est assez faible pour l'estimation des crues centennales. D'autre part, la plupart des jaugeages permettant d'obtenir la courbe d'étalonnage ont été effectués pour la gamme des basses/moyennes eaux. La courbe d'étalonnage de la station KNL est donc fortement extrapolée pour les plus forts débits, et donc les débits de crue.

Enfin, la méthode de calcul proposée par la DAVAR ne tient compte que de la surface du bassin versant. L'essentiel des observations concerne des bassins versants supérieurs à 30 km² pour

lesquels le poids de la pente devient négligeable. Pour les bassins versants de quelques hectares à quelques kilomètres carrés (ce qui est le cas au niveau de la mine), l'incertitude relative est grande.

En absence d'ajustement des formules empiriques sur les petits bassins versants et étant donné que ces formules ne tiennent pas compte de la pente et de la forme du bassin, la méthode rationnelle est retenue pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Cette méthode, adaptée pour les petits bassins versant de taille inférieure à 5 Km², est couramment utilisée pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et le retour d'expérience ne justifie aucune remise en cause de cette approche. Au contraire, les observations des traces des plus hautes eaux au niveau des évacuateurs pendant les crues extrêmes sont nettement plus basses que les niveaux prévisionnels calculés par cette approche, donnant ainsi un dimensionnement des ouvrages qui se place du point de vue de la sécurité.

Les calculs hydrologiques de dimensionnement des ouvrages hydrauliques du site de Goro sont réalisés à l'aide de la méthode rationnelle suivant une approche sécuritaire avec un coefficient de ruissellement de 1 et un temps de concentration faible (méthode de Giandotti-méthode des vitesses).

En conclusion pour l'analyse des débits de crue, l'acquisition des données doit être poursuivie sur le bassin de la Kwé afin de renforcer les estimations statistiques. En l'absence de données significatives pour l'analyse fréquentielle, la méthode régionale proposée par la DAVAR et présentée ci-dessus peut être utilisée. Pour les plus petits bassins versants, c'est la méthode rationnelle qui devra être privilégiée.

ANALYSE DES HYDROGRAMMES DE CRUE

La réaction hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation particulière telle que la précipitation est caractérisée par sa vitesse (temps de montée t_m , défini comme le temps qui s'écoule entre l'arrivée de la crue et le maximum de l'hydrogramme) et son intensité (débit de pointe Q_{IX} , volume maximum V_{max} , etc.). Ces deux caractéristiques sont fonction du type et de l'intensité de la précipitation qui le sollicite, mais aussi d'une variable caractérisant l'état du bassin versant : le temps de concentration des eaux sur le bassin.

Une averse, définie dans le temps et dans l'espace, tombant sur un bassin versant de caractéristiques connues, et dans des conditions initiales données, provoque à l'exutoire du bassin considéré un hydrogramme défini.

L'hydrogramme de crue présente la forme générale d'une courbe en cloche dissymétrique que l'on divise en quatre parties : tarissement (avant la pluie nette), crue, décrue et tarissement (après la recension hydropluviométrique étudiée).

On définit alors des temps caractéristiques :

- le temps de réponse du bassin t_p (ou "lag") correspond à l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue ou parfois du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface ;
- le temps de concentration t_c correspond au temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée "hydrologiquement" de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut estimer t_c en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct (i.e. fin de l'écoulement de surface) ;
- le temps de montée t_m correspond au temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface ;
- le temps de base t_b correspond à la durée du ruissellement direct, c'est-à-dire la longueur sur l'abscisse des temps de la base de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par de nombreux facteurs tels que :

- les conditions climatiques du milieu ;
- la pluviosité (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée) ;
- la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, orientation des versants) ;
- les propriétés physiques du bassin (nature des sols, couverture végétale) ;
- la structuration du réseau hydrographique (extension, dimension, propriétés hydrauliques) ;
- les états antérieurs d'humidité des sols.

Les figures suivantes présentent les couples averse–crue de 5 des 6 épisodes les plus forts observés sur le site de Goro combinés à la pluie observée à la mine. La pluviométrie n'étant disponible que depuis 1997, la crue du 27/03/1996 n'a pu être représentée.

Les épisodes suivants sont représentés sur ces figures :

- La crue du 29/02/2000 (Figure 35) avec des débits de pointe de 191 m³/s à la station KAL et de 49 m³/s à la station KNL ;
- La crue du 16/07/2003 (Figure 36) avec un débit de pointe de 330 m³/s à la station KAL. C'est la plus forte crue observée à cette station ;
- La crue du 23/03/2008 (Figure 37) avec des débits de pointe de 196 m³/s à la station KAL, 57,5 m³/s à la station KNL et 102 m³/s à la station KOL. C'est la seule crue enregistrée aux trois stations de jaugeage. On constate sur cette figure que la décrue de la station KNL aurait une décroissance de débit beaucoup plus faible. Ceci peut être dû à la forme géométrique de la station de jaugeage en crue ;
- La crue du 14/01/2011, correspondant à la dépression tropicale Vania (Figure 38), avec des débits de pointe de 294 m³/s à la station KAL et de 125 m³/s à la station KOL ;
- La crue du 03/07/2013 (Figure 39) avec des débits de pointe de 328 m³/s à la station KAL et de 81 m³/s à la station KNL. C'est la deuxième crue la plus forte observée à la station KAL et la plus forte observée à la station KNL.

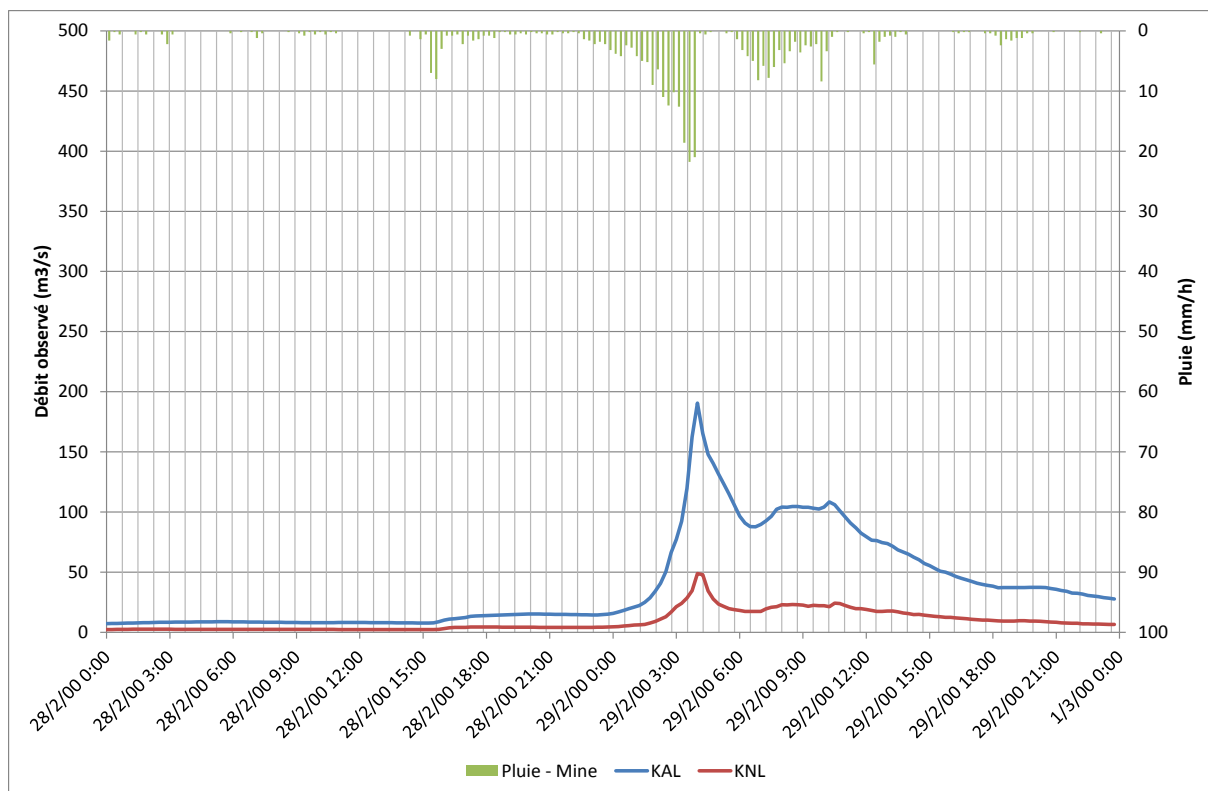


Figure 35 : Couple averse – crue du 29/02/2000 aux stations KAL et KNL

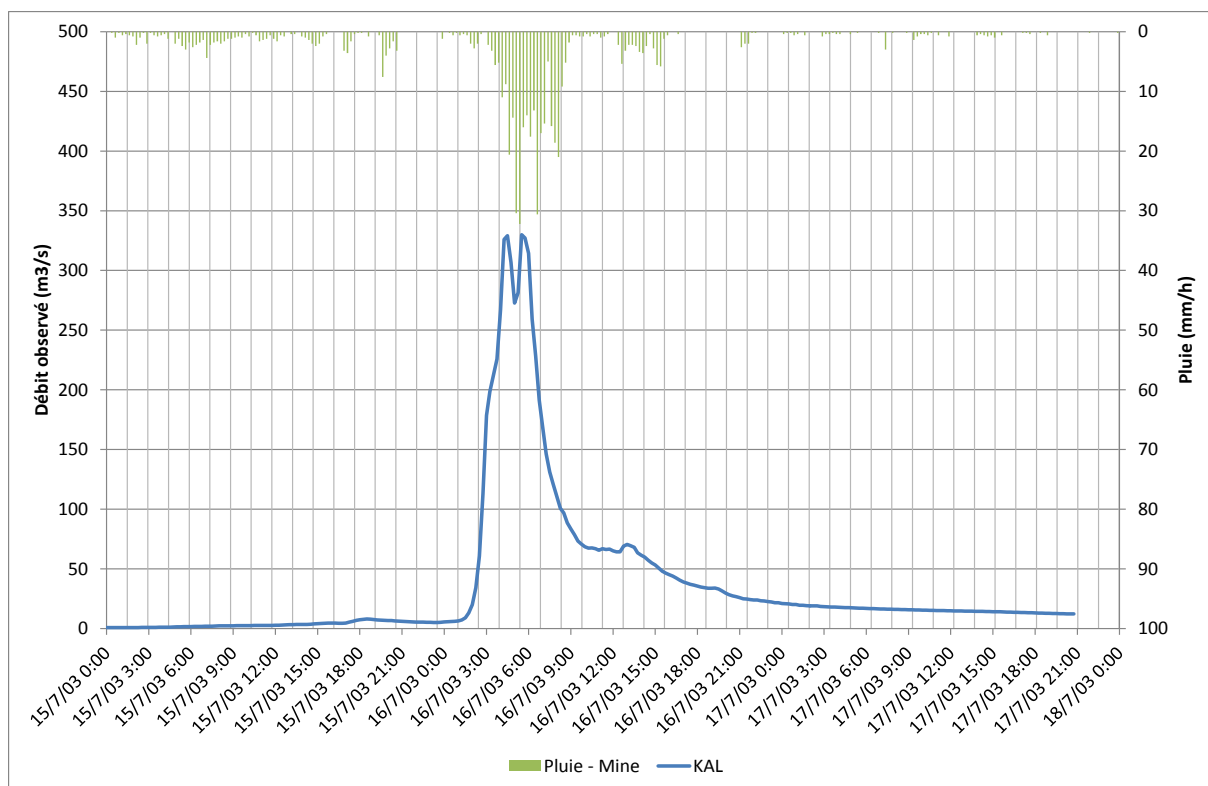


Figure 36 : Couple averse – crue du 16/07/2003 à la station KAL

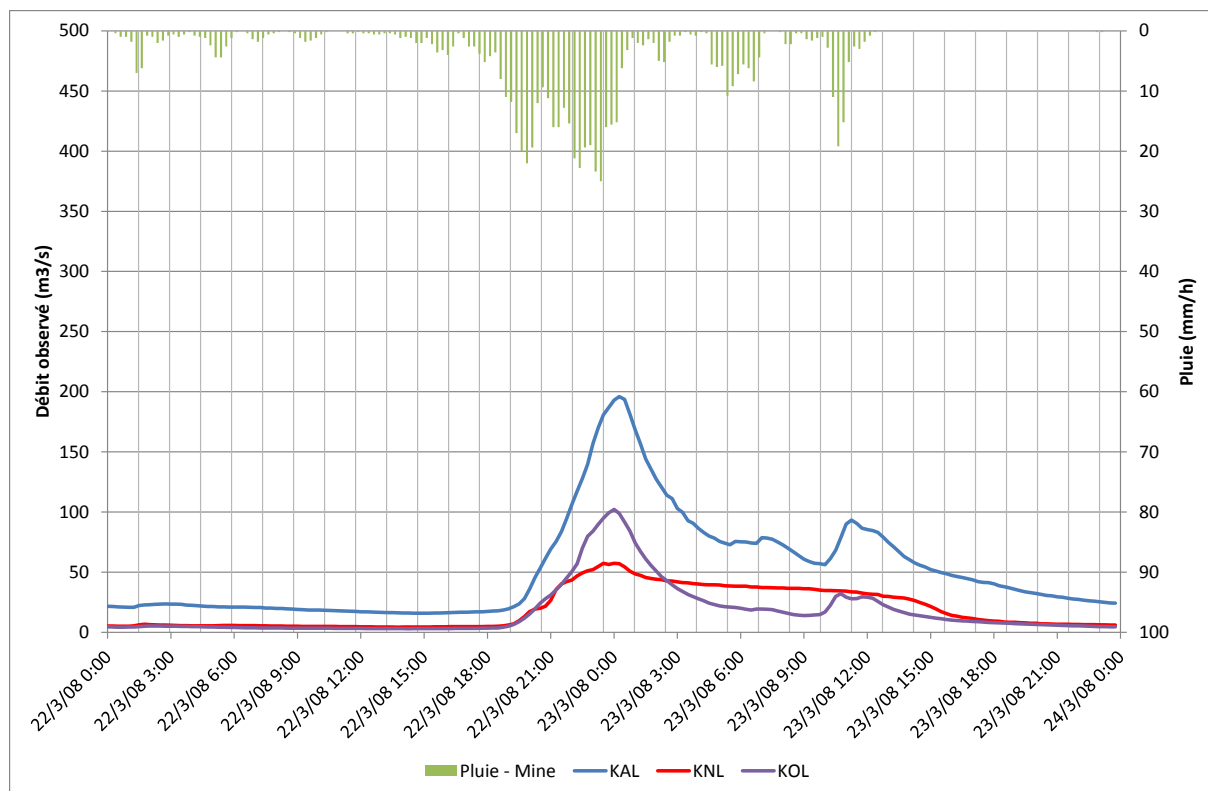


Figure 37 : Couple averse – crue du 23/03/2008 aux stations KAL, KNL et KOL

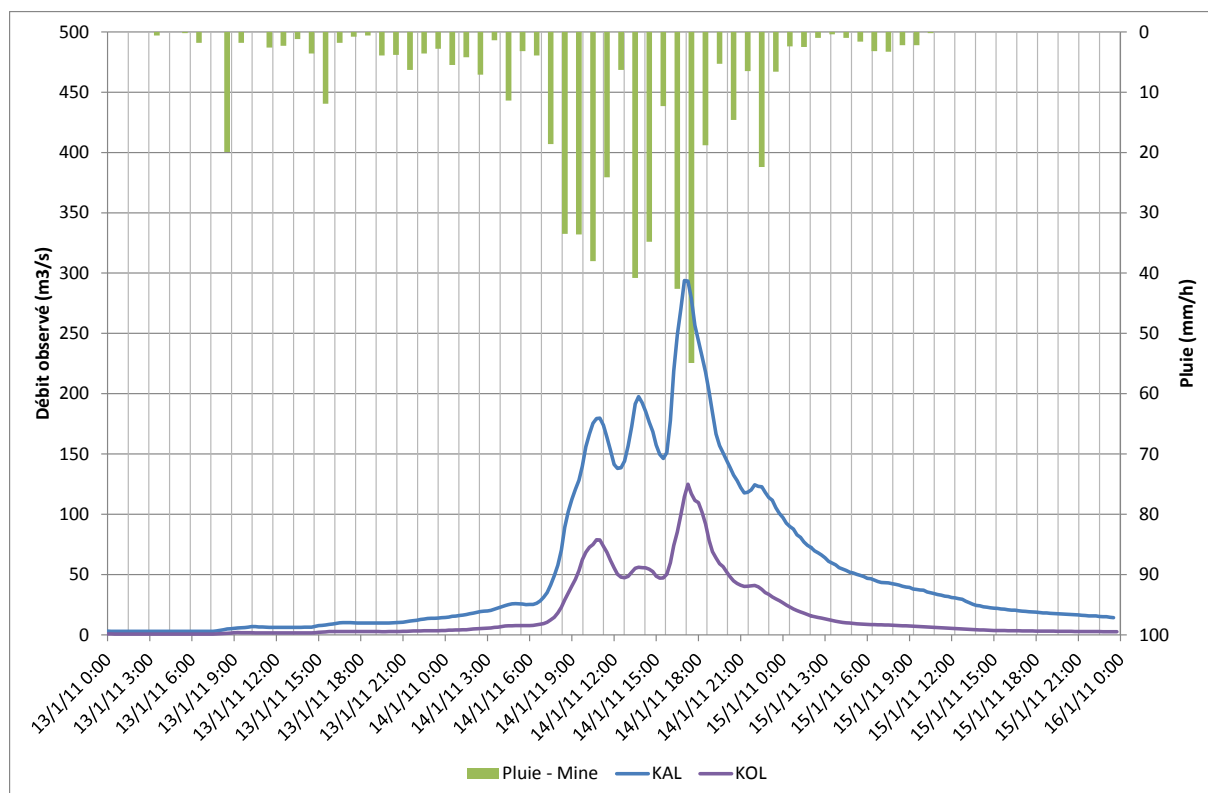


Figure 38 : Couple averse – crue du 14/01/2011 (dépression Vania) aux stations KAL et KOL

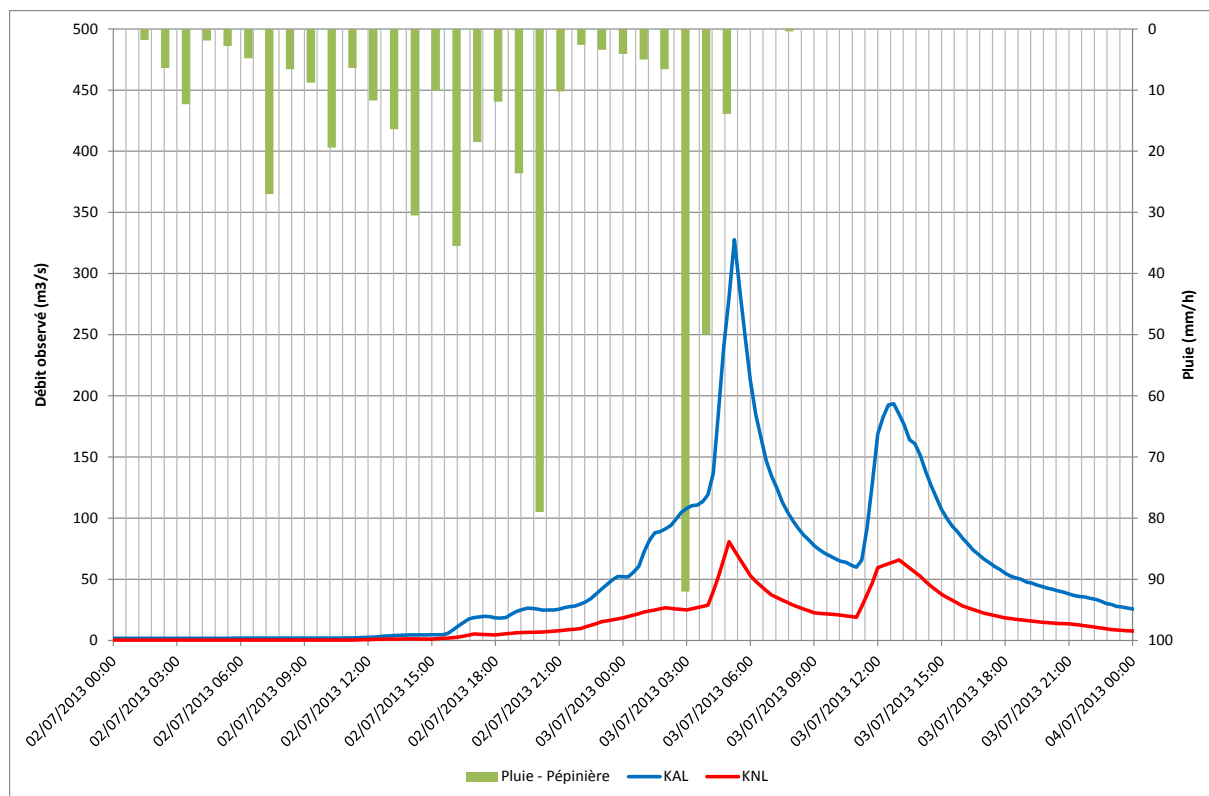


Figure 39 : Couple averse – crue du 03/07/2013 aux stations KAL et KNL

La connaissance des volumes de ruissellement lors d'un événement pluvieux revêt un grand intérêt en hydrologie pour fournir les données d'entrée du dimensionnement d'ouvrages hydrauliques. La méthode du SCS (Soil Conservation Service) du ministère de l'agriculture des Etats Unis (USDA), basée sur les caractéristiques physiques et sur l'utilisation des sols, permet d'évaluer le volume du ruissellement pour des événements pluvieux d'importance variable. Ainsi une formule simple permet le calcul d'un volume de ruissellement de la crue (noté RO) à partir de l'averse génératrice et d'un index décrivant les sols du bassin. Combinée au concept reconnu de l'hydrogramme unitaire, cette méthode permet d'obtenir des hydrogrammes de crue à l'exutoire des bassins versants.

Le volume de ruissellement de crue défini par la méthode du SCS s'écrit ainsi :

$$RO = \frac{(P - I)^2}{(P + 4I)}$$

Avec : RO : le volume de ruissellement de la crue (mm) ;

P : l'averse génératrice de la crue (mm) ;

I : la perte initiale dans le sol (mm). On définit cette perte à l'aide de la formule suivante :

$$I = 5.08 \left[\frac{1000}{CN} - 10 \right]$$

où CN, dont la valeur est comprise entre 1 et 100, est l'index d'aptitude aux crues des sols du bassin.

Cette méthode, qui a fait l'objet de nombreuses applications dans le monde entier, est appliquée aux 5 crues présentées aux pages précédentes. Les volumes de ruissellement observés aux

différentes stations de jaugeage et les pluies génératrices de crue ont été analysés sur plusieurs pas de temps (24h, 12h et 6h) afin de déterminer l'index d'aptitude aux crues des sols des bassins de la Kwé. Les paramètres de ruissellement du modèle SCS des plus fortes crues observées sur le bassin de la Kwé sont donnés dans le Tableau 10 .

Pour chaque crue analysée, les débits (instantanés et sur des durées variant de 6 à 24h), le ruissellement de la crue associé à chaque durée d et la perte initiale sur chacun des bassins étudiés sont renseignés, de même que l'averse génératrice, considérée homogène sur l'ensemble du bassin versant de la Kwé. Les coefficients CN sont déduits des précédentes valeurs citées par application de la méthode du SCS.

Dans cette analyse, on s'intéresse également aux coefficients de ruissellement des crues correspondant au rapport entre les lames d'eau ruisselées et les pluies enregistrées sur les différentes durées d. Ils sont notés CRO dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Caractéristiques de ruissellement des plus fortes crues observées sur la Kwé

		Instantané			QMAX 24h			QMAX 12h			QMAX 6h		
		KAL	KNL	KOL	KAL	KNL	KOL	KAL	KNL	KOL	KAL	KNL	KOL
Crue du 29/02/2000													
Q	m ³ /s	191	49		68	16		99	22		115	25	
P	mm				294			244			166		
RO	mm				177	130		130	92		76	52	
I	mm				27	46		28	46		25	38	
CN					66	53		64	53		67	57	
CRO	%				60 %	44 %		53 %	38 %		45 %	31 %	
Crue du 16/07/2003													
Q	m ³ /s	330			84			143			218		
P	mm				426			377			334		
RO	mm				221			188			143		
I	mm				52			49			54		
CN					50			51			49		
CRO	%				52 %			50 %			43 %		
Crue du 23/03/2008													
Q	m ³ /s	196	57	102	83	33	30	109	43	45	142	48	67
P	mm				606			471			386		
RO	mm				218	273	219	143	180	162	93	101	121
I	mm				120	93	119	110	86	97	109	103	88
CN					30	35	30	32	37	34	32	33	37
CRO	%				36 %	45 %	36 %	30 %	38 %	34 %	24 %	26 %	31 %
Crue du 14/01/2011													
Q	m ³ /s	294		125	115		41	179		67	209		76
P	mm				450			358			204		
RO	mm				302		300	235		242	137		138
I	mm				32		32	27		25	15		14
CN					61		61	65		67	78		78
CRO	%				67 %		67 %	66 %		68 %	67 %		68 %

		Instantané			QMAX 24h			QMAX 12h			QMAX 6h		
		KAL	KNL	KOL	KAL	KNL	KOL	KAL	KNL	KOL	KAL	KNL	KOL
		Crue du 03/07/2013											
Q	m ³ /s	328	81		100	31		139	42		161	44	328
P	mm				498			307			179		
RO	mm				261	257		182	174		105	91	
I	mm				60	61		29	32		17	22	
CN					46	45,4		64	62		75	70	
CRO	%				52 %	52 %		59 %	57 %		59 %	51 %	52 %

L'analyse des volumes de ruissellement révèle les points suivants :

- la crue du 29/02/2000 présente des coefficients CN variant entre 55 et 65 pour une crue d'une période de retour d'environ 3 ans à la station KAL. Les valeurs de CN sont plus faibles à la station KNL qu'à la station KAL, cependant les données restent assez constantes indépendamment de la durée caractéristique de ruissellement considérée. En outre, il a déjà été noté précédemment que les débits de crue de cette station étaient probablement sous-estimés en raison d'une trop faible extrapolation de la courbe de tarage à la station KNL. Les trois mois précédant cette crue, il a plu 2 350 mm à la station de la mine ;
- la crue du 16/07/2003 donne une valeur de CN de l'ordre de 50 pour une période de retour du débit de pointe de l'ordre de 20 ans. Les trois mois précédant cette crue, il a plu 1 100 mm à la station de la mine ;
- la crue du 23/03/2008, d'une période de retour d'environ 3-4 ans à la station KAL, donne des valeurs de CN de l'ordre de 35. Elle a été observée sur l'ensemble des stations étudiées et donne des paramètres de ruissellement homogènes sur l'ensemble du bassin de la Kwé. Les trois mois précédant cette crue il a plu environ 1 800 mm à la station de la mine ;
- la crue du 14/01/2011, d'une période de retour d'environ 19 ans à la station KAL, donne des valeurs de CN variant entre 61 et 78 selon la durée considérée. On note cependant que les paramètres de ruissellement sont voisins pour les stations KOL et KAL pour chaque durée étudiée. Les trois mois précédant cette crue, il a plu environ 1 100 mm à la station de la mine ;
- la crue du 03/07/2013, d'une période de retour de 19 ans à la station KAL et d'environ 12 ans à la station KNL, donne des valeurs de CN comprises entre 45 et 70. Les paramètres de ruissellement sont sensiblement homogènes pour les deux stations. Les 3 mois précédant cette crue, il a plu environ 800 mm à la station Mine.

Ce type d'analyse présente l'intérêt d'évaluer les paramètres de ruissellement des bassins versants en crue sur le site de Goro pour des crues moyennes à fortes. Ces analyses devront être poursuivies à l'avenir afin d'approfondir la compréhension du processus de formation des crues et des caractéristiques de ruissellement des bassins versants.

Une certaine homogénéité sur l'ensemble des bassins versants étudiés a été montrée ici, démontrant ainsi la possibilité de transposer ces méthodes à d'autres bassins versants non jaugés du site, permettant ainsi un dimensionnement des ouvrages hydrauliques sans faire surestimation des coefficients de ruissellements.

5.2.4.3 Analyse des étiages

En hydrologie, l'étiage correspond statistiquement (sur plusieurs années) à la période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas (basses eaux). C'est une valeur annuelle. L'étiage intervient pendant une période de tarissement et est dû à une sécheresse forte et prolongée qui peut être fortement aggravée par des températures élevées favorisant l'évaporation.

Dans le cadre de l'analyse des débits d'étiage, la distinction suivante est faite pour chaque année :

- le débit d'étiage journalier (absolu) ;
- le QMNA est une valeur du débit mensuel d'étiage atteint par un cours d'eau pour une année donnée. Calculé pour différentes durées : 2 ans, 5 ans, etc., il permet d'apprécier statistiquement le plus petit écoulement d'un cours d'eau sur une période donnée. Le QMNA le plus courant est le QMNA5, c'est-à-dire le « QMNA ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée », ce qui correspond à un « débit ayant la probabilité de ne pas se reproduire plus qu'une fois tous les 5 ans » ou encore à un « débit ayant une probabilité d'être dépassé 4 années sur 5 » ;
- le Débit Caractéristique d'Etiage (DCE), correspond au débit égalé ou non dépassé 10 jours par an. Il s'agit d'un descripteur fréquemment utilisé pour caractériser les étiages d'un cours d'eau.

Les caractéristiques d'étiage médian définies ci-dessus pour l'ensemble des stations de jaugeage sont données au Tableau 11.

Tableau 11 : Caractéristiques d'étiage médian aux stations de jaugeage

		KAL	KNL	KOL	Rivière des Lacs	Rivière Bleue
Débit étiage absolu	m ³ /s	0,24	0,195	0,02		
	l/s/km ²	7,7	17,87	1,51		
QMNA	m ³ /s	0,49	0,21	0,09	1,246	0,402
	l/s/km ²	14,99	19,62	7,26	16,18	12,07
DCE	m ³ /s	0,32	0,204	0,025	0,379	0,251
	l/s/km ²	8,46	18,64	2,07	4,92	7,54

Il est difficile de tirer des conclusions à partir des valeurs caractéristiques de ce tableau. Les QMNA de la station KAL se situent entre les valeurs spécifiques de QMNA des stations Rivière des Lacs et Rivière Bleue. Les DCE de la station KAL sont assez similaires à celles de la station Rivière Bleue.

Les caractéristiques d'étiage de la station KNL semblent assez peu variables d'une caractéristique à l'autre et les valeurs spécifiques semblent assez élevées au regard des stations régionales analysées et de la station KAL.

La durée d'observation à la station KOL étant très courte, les valeurs caractéristiques d'étiage semblent peu significatives. D'autre part, la présence d'une source à proximité de cette station influence fortement les débits les plus faibles. Les analyses d'étiage plus détaillées ne seront pas conduites, par la suite, au niveau de cette station.

Les quantiles de DCE aux stations KAL et KNL sont donnés dans le Tableau 12. Ces estimations statistiques sont obtenues par ajustement à une loi de Gumbel pour les étiages humides (valeurs maximales) et à une loi Log-Normale pour les étiages secs (valeurs minimales).

Tableau 12 : Quantiles de DCE aux stations KAL et KNL

	T (années)	KAL		KNL	
		Q (m ³ /s)	Q (l/s/km ²)	Q (m ³ /s)	Q (l/s/km ²)
Etiages humides	50	0,89	27,1	0,30	28,73
	20	0,73	22,4	0,27	25,92
	10	0,62	18,8	0,25	23,76
	5	0,5	15	0,22	21,50
Etiage médian	2	0,31	9,4	0,19	18,08
Etiages secs	5	0,12	3,8	0,16	15,60
	10	0,08	2,6	0,15	14,32
	20	0,06	1,9	0,14	13,35
	50	0,04	1,3	0,13	12,33

D'après les valeurs du tableau, on constate, comme précédemment, que les quantiles d'étiage humide à la station KNL sont assez proches de ceux de la station KAL pour les périodes de retour les plus fortes (en termes de débit spécifique). En revanche, les valeurs des deux stations diffèrent considérablement pour les étiages humides courants, l'étiage médian et les étiages secs. Cette différence peut provenir de l'établissement des courbes de tarages à l'une ou l'autre des deux stations (sous-estimation des débits d'étiage à la station KAL et/ou surestimation des débits d'étiage à la station KNL).

BASSIN DE LA KWE PRINCIPALE A LA STATION KAL

La chronique des caractéristiques d'étiage à la station KAL sur la période 1996–2012 est représentée sur la Figure 40. On constate que chaque année les valeurs de débit d'étiage absolu sont très proches des DCE.

L'ajustement des DCE à la station KAL à une loi de Gumbel pour les étiages humides et à une loi Log-Normale pour les étiages secs sont représentés sur la Figure 41.

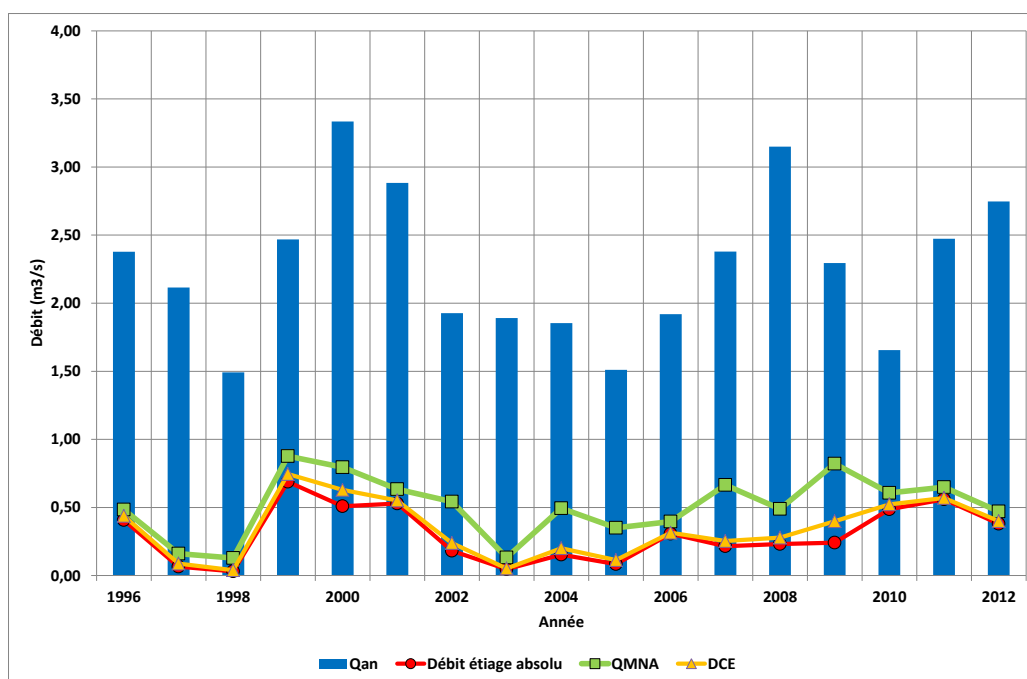


Figure 40 : Caractéristiques d'étiages à la station KAL sur la période 1996-2012

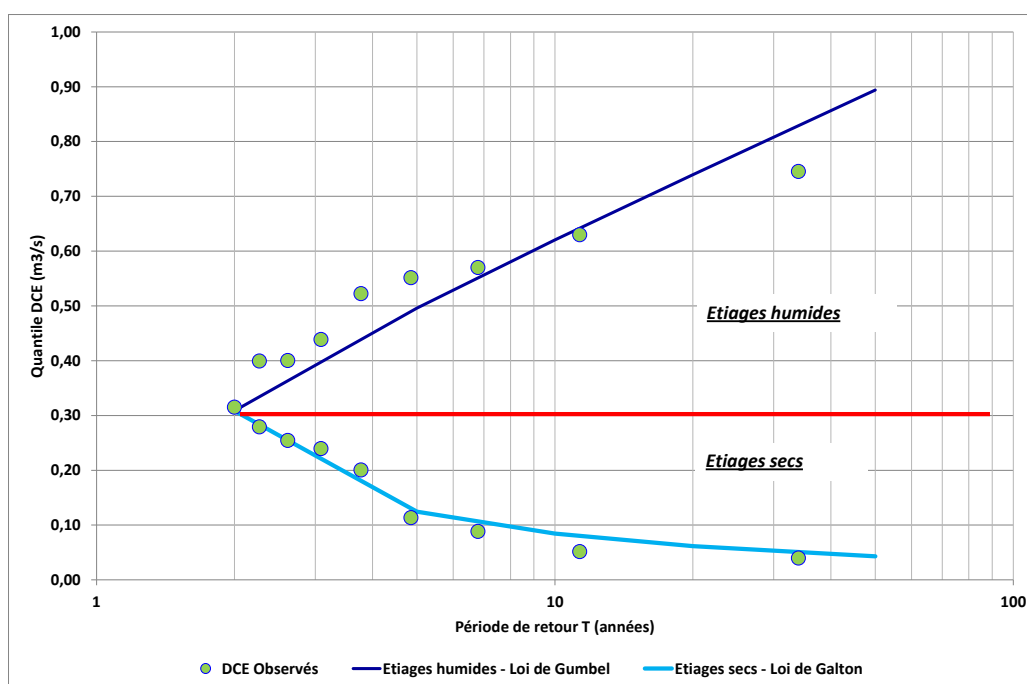


Figure 41 : Résultats d'analyse fréquentielle des DCE à la station KAL

BASSIN DE LA KWE NORD A LA STATION KNL

La chronique des caractéristiques d'étiage à la station KNL sur la période 1996–2008 est représentée sur la Figure 42. Là encore, on constate que chaque année les valeurs de débit d'étiage absolu sont très proches des DCE.

L'ajustement des DCE à la station KAL à une loi de Gumbel pour les étiages humides et à une loi Log-Normale pour les étiages secs sont représentés sur la Figure 43. Conformément à ce qui a été dit précédemment, les DCE de la station KNL présentent assez peu de variabilité par rapport à ceux de la station KAL.

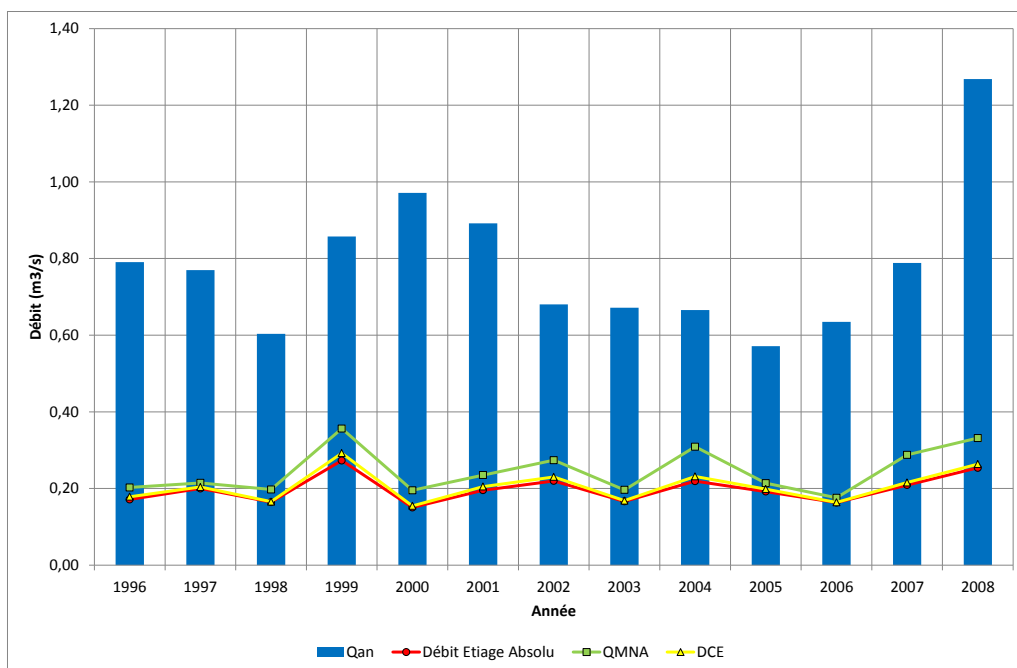


Figure 42 : Caractéristiques d'étiage à la station KNL sur la période 1996-2008

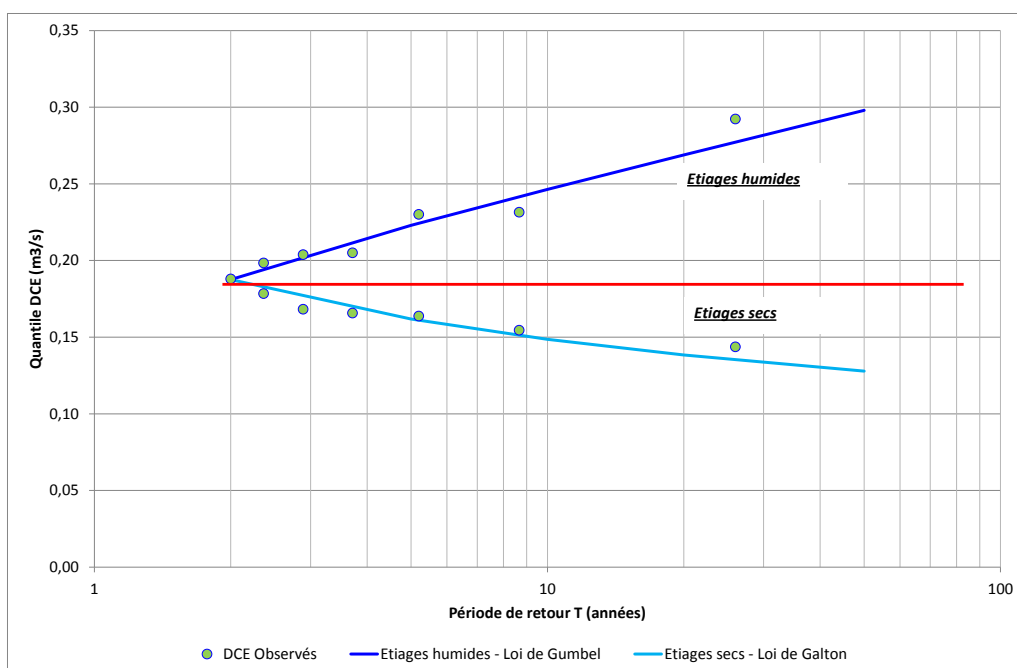


Figure 43 : Résultats d'analyse fréquentielle des DCE à la station KNL

5.2.5 Synthèse du fonctionnement hydrologique du bassin de la Kwé

D'une manière globale, la station KAL jauge le bassin versant amont de la Kwé, qui, lui-même, peut se décomposer en trois sous bassins versants de taille équivalente (Figure 44) :

- La station KOL (rouge) jauge le sous bassin versant ouest (approximativement 1/3 de la superficie) ;
- La station KNL (vert) jauge, quant à elle, le sous-bassin versant nord (représente également 1/3 de la superficie environ) ;
- L'autre tiers (jaune), non jaugé, couvre un sous-bassin versant dit « médian » correspondant à la partie aval de la Kwé Ouest, et le sous-bassin de la Kwé Est ;

L'année 2007 est commune à tous les échantillons respectifs de chaque station analysée.

Tableau 13 : DCE et module sur l'année type 2007

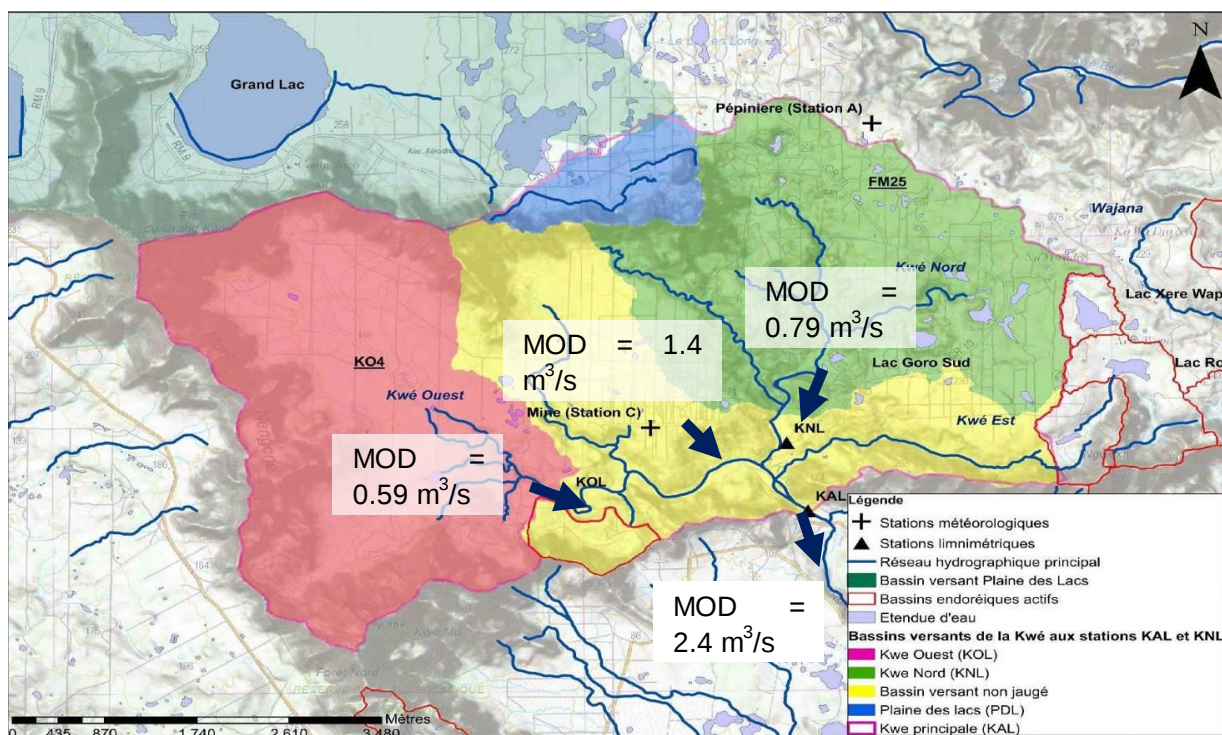
		KAL	KNL	KOL	Rivière des Lacs	Rivière Bleue
Débit étiage absolu	m ³ /s	0,22	0,21	0,018	0,58	0,32
	l/s/km ²	6,54	20,13	1,51	7,57	9,57
QMNA	m ³ /s	0,66	0,29	0,088	1,63	0,54
	l/s/km ²	20,17	27,74	7,39	21,19	16,31
DCE	m ³ /s	0,25	0,22	0,022	0,66	0,33
	l/s/km ²	7,71	20,78	1,87	8,62	9,79
Module	m ³ /s	2,38	0,79	0,59	6,34	2,19
	l/s/km ²	72,12	76,01	49,81	82,34	65,85

Source : A2EP

L'analyse du Tableau 13 confirme de manière plus nette la tendance énoncée auparavant :

- le sous-bassin versant nord contribue aux écoulements dans une proportion conforme à ses dimensions (1/3 du module et de QMNA de la station KAL) ;
- le sous-bassin versant ouest est quant à lui peu contributif à l'écoulement (20 % du module, 13 % du QMNA et 10 % du DCE de la station KAL) ;
- en revanche, l'ensemble composé par le sous-bassin versant médian et le sous-bassin de la Kwé Est s'avère fort contributif à l'écoulement (48% du module et 60% du DCE de la station KAL).

A la suite de cette analyse, on peut supposer que des connexions hydrogéologiques pourraient être à l'origine de cette disparité de régime de débits d'un sous-bassin versant à l'autre. Ces connexions hydrogéologiques pourraient être dans le sens « plaine des lacs >> BV Médian », ou encore plus vraisemblablement dans le sens « KO4 >> BV Médian ».



Source : A2EP, 2012e

Figure 44 : Comparaison des débits caractéristiques de l'année type 2007 sur 3 stations de la Kwé

5.2.6 Bilans hydrologiques

Se référer au document - Bilans hydrologiques – Bassin versant de la Kwé et Plaine des Lacs (A2EP, 2012d)

Ce volet constitue la synthèse d'un rapport technique (A2EP, 2012d) fourni sur le CD-ROM des études de référence.

Un premier bilan hydrologique du bassin versant de la Kwé avait été réalisé avec le modèle GAWSER sur les stations limnimétriques KAL (Kwé Principale) et KNL (Kwé Nord) Golder, 2002a). La période de calibration du modèle avec des données conjointes de précipitations et de débit était alors de 4,5 années, de janvier 1997 à juin 2001. Une des conclusions importantes de ce bilan était qu'il existait un écart important entre les débits d'étiage mensuels simulés et observés qui ne pouvait pas être résolu par un ajustement mineur des paramètres de calage du modèle, les débits calculés étant significativement plus faibles que ceux qui avaient été observés. Un transfert d'eau souterraine en provenance d'un bassin extérieur était alors nécessaire pour améliorer le calage en basses eaux. Ce débit extérieur a été évalué à 250 mm/an sur un bassin de 33 km², soit 0,263 m³/s de moyenne annuelle sur la période de calibration.

Depuis, une étude de détermination des bilans hydrologiques du bassin de la Kwé a été réalisée par la société A2EP en avril 2012 (A2EP 2012d.). Les hypothèses, les principes de modélisation et une synthèse des résultats sont présentés ci-après. Les objectifs de ces bilans hydrologiques concernaient :

- l'établissement de bilans en eau sur les bassins d'alimentation respectifs des différentes branches de la Kwé (évapotranspiration, pluie efficace, répartition entre écoulement rapide et écoulement souterrain) ;

- l'analyse de l'introduction d'un débit extérieur au bassin pour équilibrer les bilans en eau de la Kwé afin de donner un ordre de grandeur de l'échange.

Les bilans ont été réalisés avec le modèle GARDENIA (BRGM, 2003), un modèle hydrologique global de bassins versants qui permet, à partir de séquences de données météorologiques (pluie et évapotranspiration potentielle ETP) sur le bassin d'alimentation, de calculer le débit à l'exutoire d'un cours d'eau.

Ce modèle simule le fonctionnement du cycle de l'eau par un système de 3 ou 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premières dizaines de centimètres de sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide ;
- une ou deux zone(s) aquifère(s) qui produisent un écoulement lent.

SYNTHESE DES RESULTATS DE SIMULATION

Les bilans hydrologiques ont été établis au niveau des stations KAL, KNL et KOL. La longueur de la chronique d'observation à KOL étant faible, une autre modélisation a été introduite sur la différence des débits entre les stations KAL et KNL, correspondant aux bassins versants de la Kwé Est et Ouest, notée « Bassin intermédiaire ».

Au pas de temps annuel, les résultats de modélisation montrent une bonne homogénéité des différentes composantes des bilans hydrologiques sur les stations. Ces résultats sont indiqués dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Bilans hydrologiques annuels – synthèse des résultats de simulation

	Pluie	ETP	ETR	Pluie nette	Recharge	Débit externe	Débit de surface	Débit souterrain
KAL	3142	1154	1052	2092	903	0	2109	879
KNL	3286	1154	1076	2212	830	0	2217	804
KOL	3127	1145	1136	1960	945	0	1954	837
Bassin intermédiaire	3131	1156	1072	2059	784	148	2211	746

L'introduction d'un facteur de transfert de bassin avec un débit externe versant n'a pas permis de mieux équilibrer les bilans sauf sur le bassin global de la Kwé Ouest. Cependant, la valeur trouvée de 148 mm/an, correspondant à un débit de 0,1 m³/s, ne représente que 5 % de la pluviométrie annuelle, ce qui est dans la gamme d'incertitude des données d'entrée du modèle. Des simulations ont également été réalisées avec un débit de transfert de bassin de 250 mm/an. Les résultats de modélisation ont fortement été dégradés par l'introduction de cette valeur, rejetant ainsi l'hypothèse de transfert évoquée dans l'étude GOLDER.

Aux stations KAL, KNL et au niveau du bassin intermédiaire, l'introduction de plusieurs composantes d'écoulement souterrain a permis d'améliorer les résultats de calage du modèle avec un débit souterrain lent et un débit souterrain très lent.

Dans la suite de ce chapitre, on s'intéresse aux résultats de simulation au pas de temps mensuel. Les figures 45 à 48 fournissent la répartition mensuelle des composantes des bilans hydrologiques aux stations de jaugeage. Les simulations ont permis de reproduire assez correctement les régimes de basses et de moyennes eaux sur l'ensemble des bassins, sauf au niveau de la station KOL où

les débits d'étiage simulés semblent surestimés. De manière générale, entre décembre et mai, on constate que les lames d'eau sont majoritairement composées de ruissellement de surface. Entre juillet et novembre, cette répartition est mieux équilibrée, voire inversée, les écoulements souterrains constituant en majorité l'écoulement total.

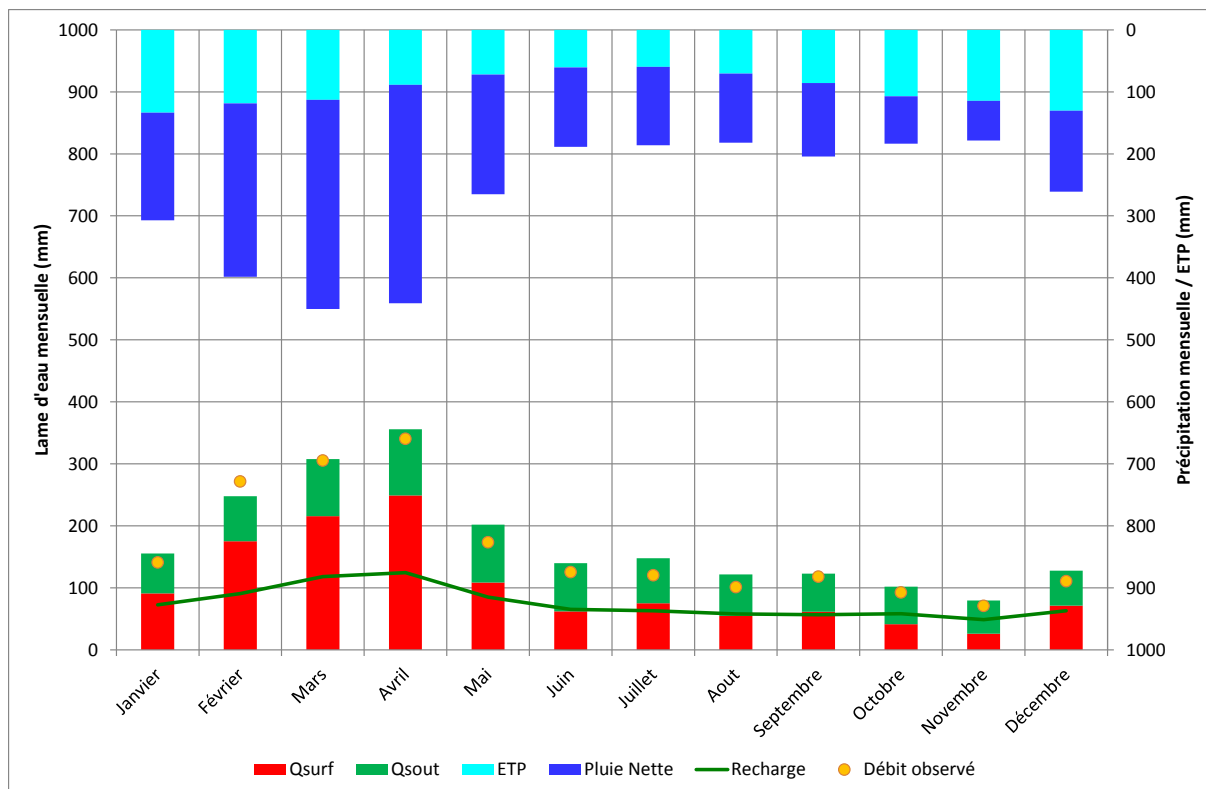


Figure 45 : Résultats de simulation à la station KAL

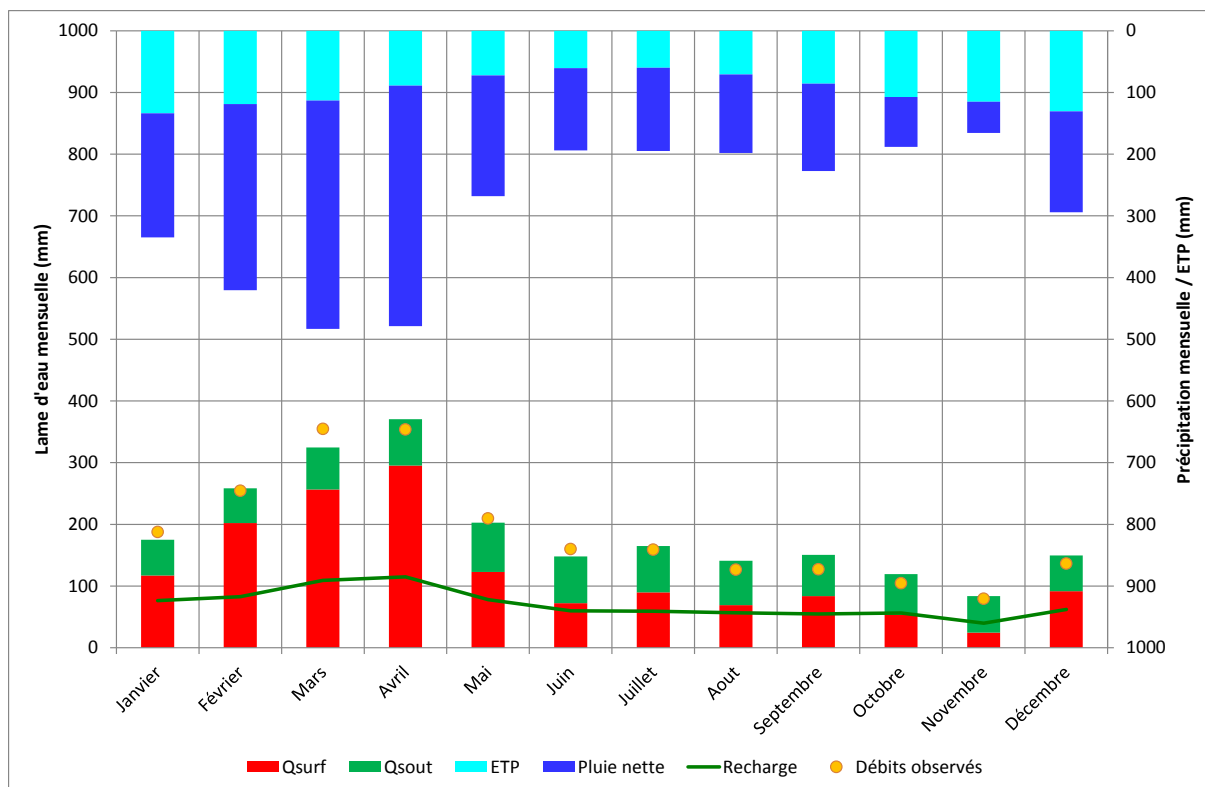


Figure 46 : Résultats de simulation à la station KNL

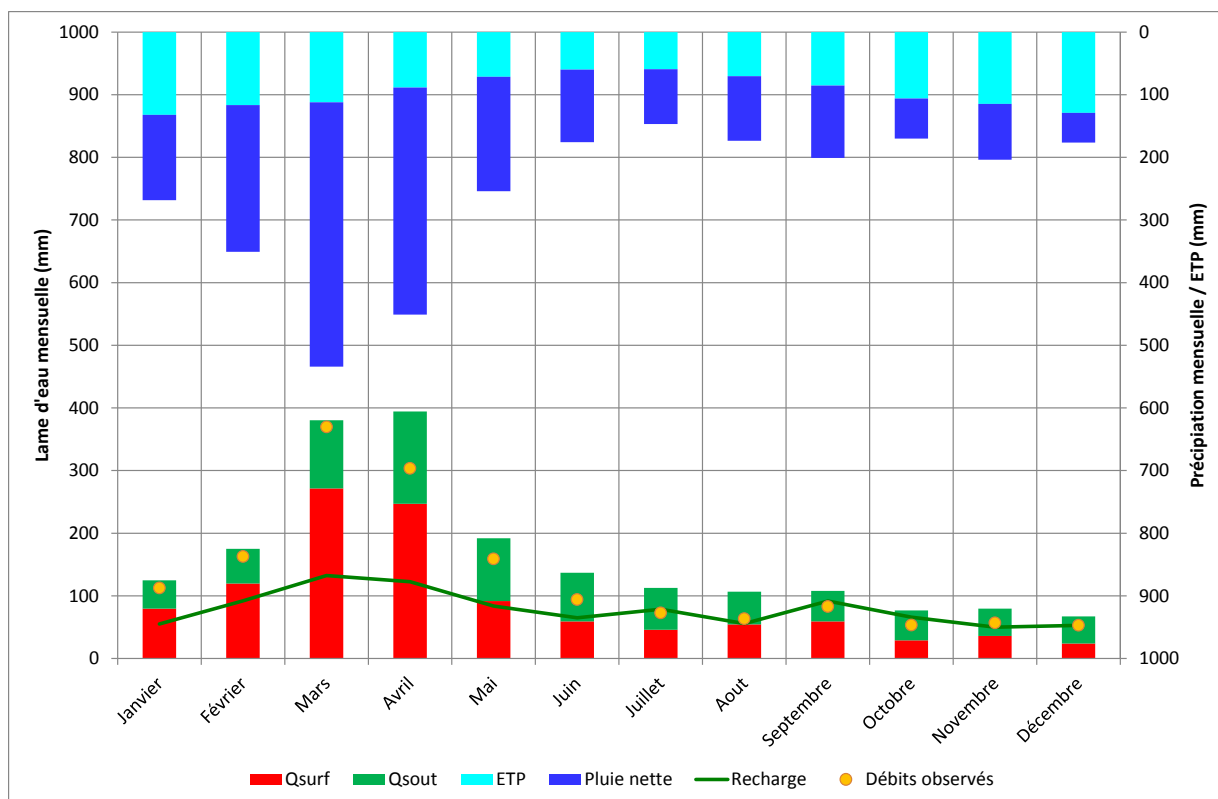


Figure 47 : Résultats de simulation à la station KOL

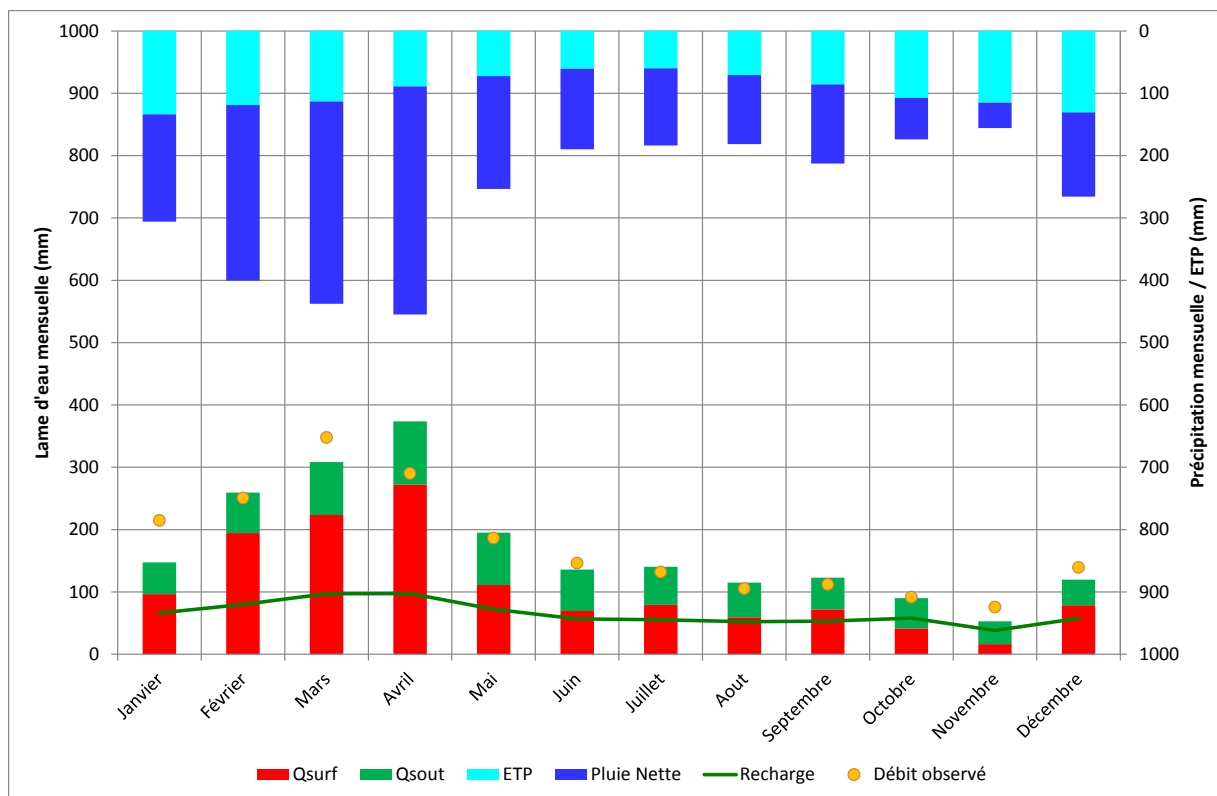


Figure 48 : Résultats de simulation au « bassin intermédiaire »

Pour chaque mois simulé, les ratios du débit de surface au débit total et du débit souterrain au débit total sont comparés à la pluie mensuelle. La figure 49 illustre cette analyse à la station KAL. On y remarque que les écoulements de surface représentent au maximum 80 à 85 % des écoulements totaux. On constate également qu'il existe un seuil de précipitation au-delà duquel les écoulements souterrains deviennent prépondérants par rapport aux écoulements de surface. Selon les stations considérées, ce seuil est situé entre 210 et 250 mm/mois.

L'imperméabilisation des sols des futurs projets relatifs à l'exploitation minière (parc à résidus, verses) va entraîner la modification des écoulements aux exutoires des bassins versants, notamment au niveau de la recharge de l'aquifère. La mise en œuvre de ce type de modélisation permettra la quantification des impacts sur les écoulements.

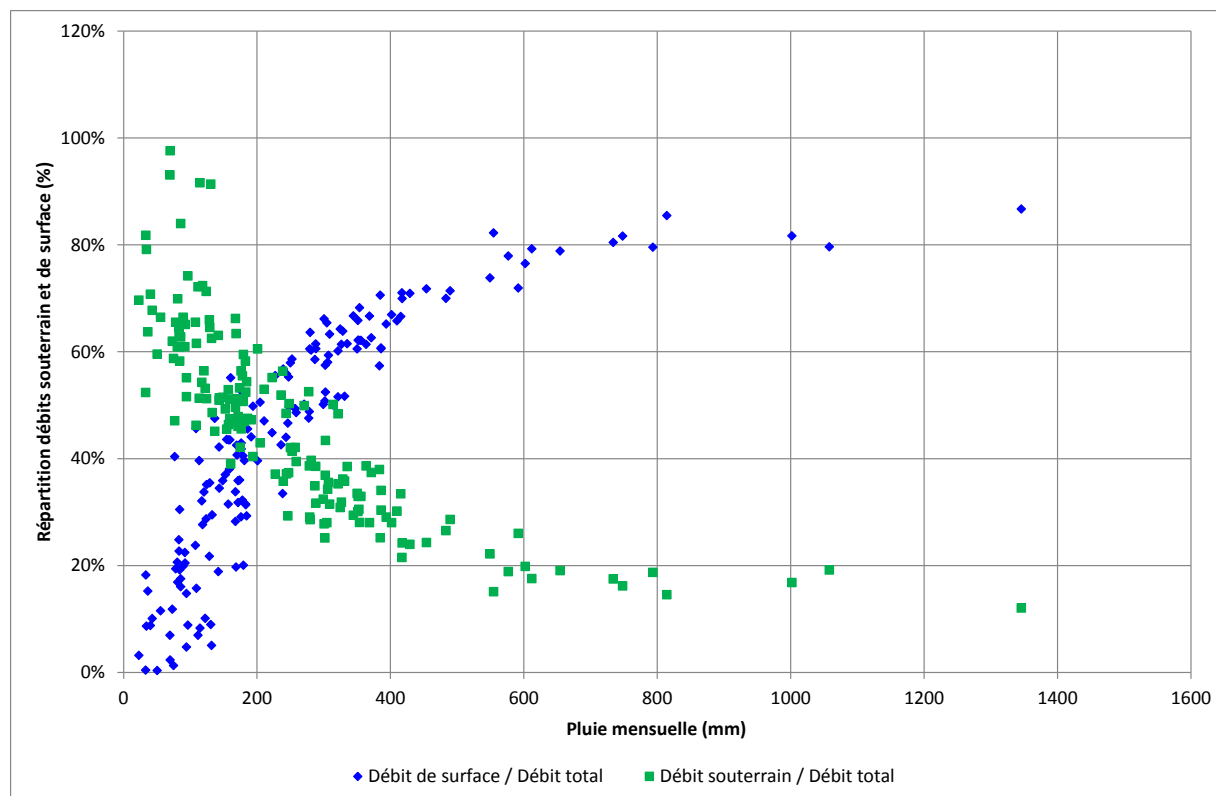


Figure 49 : Analyse du seuil de précipitation de prépondérance des écoulements souterrains – station KAL

5.2.7 Qualité physico – chimique des eaux superficielles

5.2.7.1 Etat actuel de la qualité des rivières

 Se référer aux documents – Synthèse de la Qualité des eaux souterraines et superficielles – Secteur de Goro (A2EP, 2012a) et Analyse approfondie de la Qualité des eaux souterraines et superficielles – Secteur de Goro (A2EP, 2014a)

Ce volet constitue la synthèse de 2 rapports techniques (A2EP, 2012a et 2014a) fournis dans le CD-ROM des études de référence. Les données étudiées correspondent à 50 échantillons d'eau de surface et à 6 échantillons d'eau de résurgence, prélevés sur les rivières et plans d'eau suivants :

- Kwé Nord, Kwé Ouest et Kwé Est,
- Kué Binyi, Wajana, Entonnoir, Truu, creek Crête Sud
- Grand Lac, creek de la plaine des lacs, rivière Kadji

Tous les échantillons étudiés ont été prélevés durant quatre campagnes :

- du 8 juillet au 1er septembre 2011 en période de « moyennes eaux » ;
- du 25 octobre au 20 décembre 2011 en période de « basses eaux » ;
- du 13 février au 9 mars 2012 en période de « hautes eaux » ;
- du 26 juin au 6 août 2012 en période de « hautes eaux ».

Le Tableau 15 synthétise l'ensemble des analyses chimiques réalisées sous forme de statistiques descriptives. Les résultats obtenus sont les suivants :

- les eaux superficielles ont un faciès hydrochimique principalement bicarbonaté et magnésien tout comme les eaux de l'ensemble saprolite/péridotite (Figure 50). Ce résultat est cohérent dans la mesure où l'aquifère principal fournit l'essentiel du débit de base des principales rivières du secteur de Goro ;
- dans le détail, des différences apparaissent néanmoins sur les concentrations de certains éléments chimiques. Les valeurs médianes de concentration en **hydrogénocarbonates** et en **magnésium** notamment se situent entre celles de la latérite et celles de la saprolite/péridotite ;
- les concentrations en **aluminium, calcium, chrome, chrome VI, et manganèse** sont plus faibles dans les eaux superficielles que dans les eaux souterraines.

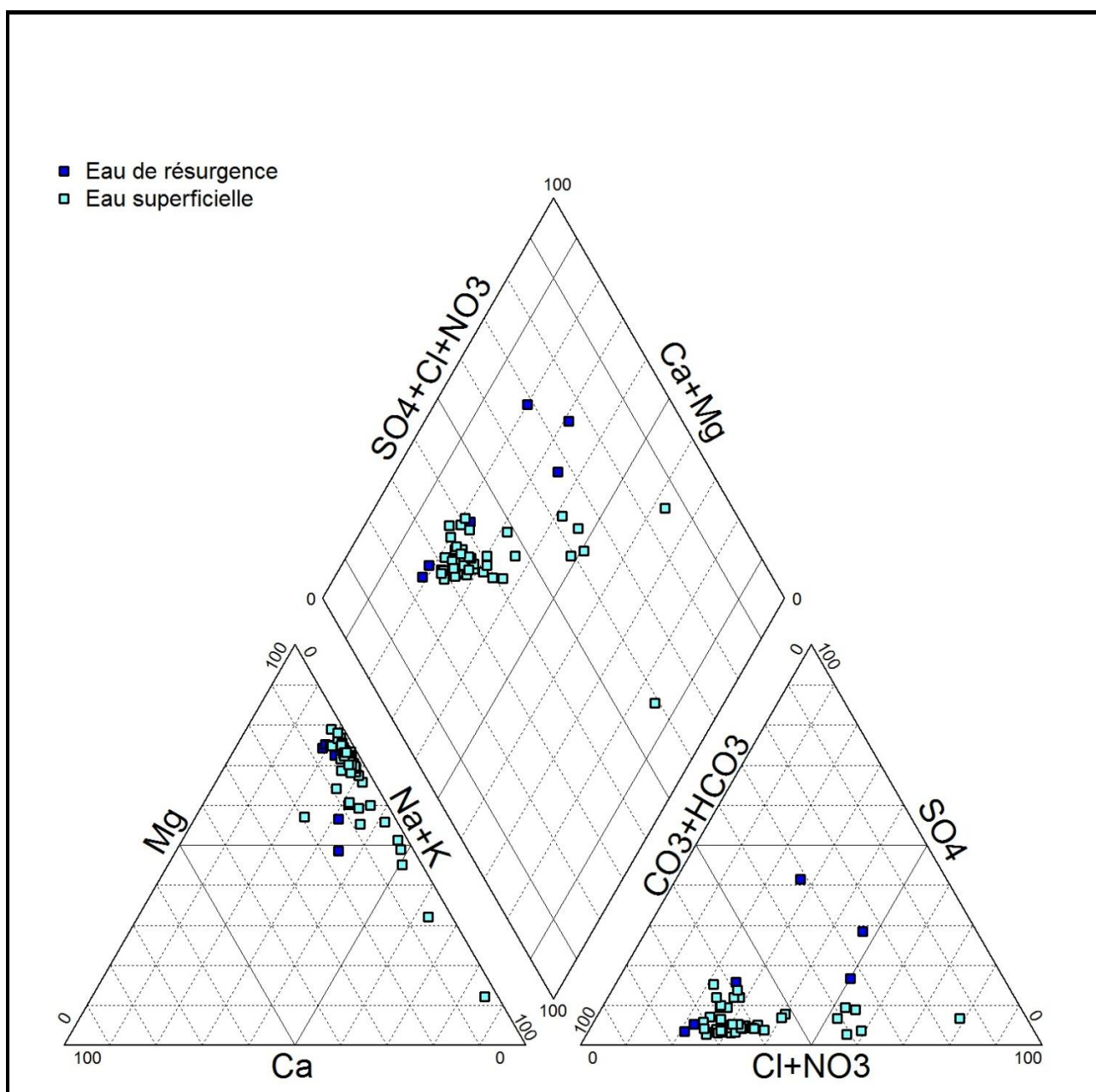


Figure 50 : Projection des signatures chimiques des eaux de surface dans le diagramme de Piper suivant la composition chimique des eaux prélevées (A2EP, 2014a)

Tableau 15 : Statistiques descriptives des résultats d'analyses chimiques obtenus pour les eaux de surface (A2EP, 2014a)

Paramètre	LQ (mg/L)	Eau superficielle (n = 50)			
		% de détection	Médiane (mg/L)	± étendue interquartile (mg/L)	Min-Max (mg/L)
Aluminium dissous	0.001	96	0.005	0.026	< 0.001 - 0.374
Ammonium dissous*	0.01	98	0.005	0	< 0.01 - 0.01
Calcium dissous	0.1	100	0.5	0.15	0.2 - 4.2
Carbonates	0.1	46	0.05	0.025	< 0.1 - 0.26
Chlorures dissous	0.1	100	10.2	1.1	6.5 - 13.4
Chrome dissous**	0.001	72	0.0055	0.006	< 0.001 - 0.037
Chrome VI**	0.005	34	0.0025	0.001	< 0.005 - 0.016
Fer dissous*	0.001	100	0.039	0.034	0.002 - 0.465
Fluorures dissous*	0.01	56	0.01	0.003	< 0.01 - 0.04
Hydrogénocarbonates	0.1	100	38.5	7.1	2.4 - 57.8
Hydroxydes	0.0017	8	0.0065	0.0026	0.0009 - 0.0389
Magnésium dissous	0.01	100	8.39	1.87	0.72 - 13.87
Manganèse dissous*	0.001	62	0.001	0.002	< 0.001 - 0.169
Nitrates dissous*	0.1	76	0.2	0.1	< 0.1 - 0.9
Nitrites dissous*	0.01	2	0.005	0.0	≤ 0.01
Phosphates dissous*	0.1	2	0.05	0.0	≤ 0.1
Potassium dissous	0.05	92	0.15	0.05	< 0.05 - 0.44
Silice dissous	0.1	94	4.0	1.9	< 0.1 - 8.0
Sodium dissous	0.01	100	5.74	0.62	4.08 - 9.33
Sulfates dissous	0.1	100	2.2	0.6	0.5 - 10.7
Conductivité	-	-	100.7	19.9	36.1 - 144.1
pH	-	-	7.61	0.17	5.67 - 8.36

LQ = limite de quantification de la méthode

* Paramètre indésirable

** Paramètre concernant une substance toxique

La méthode du 90e centile a été utilisée pour établir les fonds géochimiques des eaux surface (BRGM, 2007 et 2008). Ce fond est présenté au Tableau 46 du point 5.3 Eaux souterraines

5.2.7.2 Transport solide – Analyse des MES

Plusieurs études d'évaluation du transport solide sur le site de Goro ont été réalisées entre 2002 et 2011.

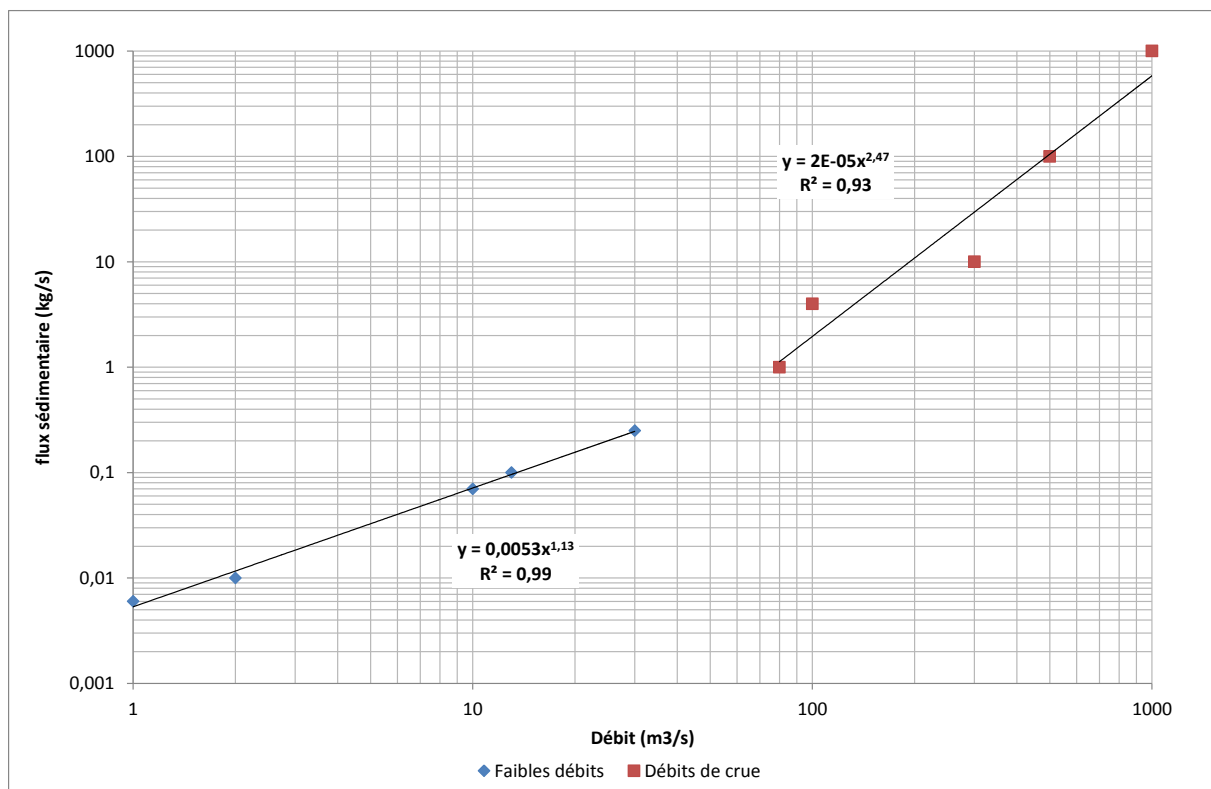
- [1] – GOLDER 2002c, Dispersion modelling of total suspended solids and total dissolved solids in the freshwater reservoir, Golder Associates, novembre 2002;
- [2] – LANDLOCH 2004, Erosion and sediment study, Goro project area, Landloch Pty Ltd, août 2004;
- [3] Traitement et analyse des données d'eau de surface – Stations KAL, KOL et KNL – Période 2003-2011, Golder Associates, juillet 2011.

Dans la suite de ce chapitre, on propose une synthèse des études antérieures ainsi qu'un premier bilan de la sédimentation sur le site de Goro.

Synthèse bibliographique des études relatives au transport solide

ETUDE GOLDER 2002

L'étude de Golder 2002c avait pour objectif la modélisation du transport sédimentaire dans le réservoir projeté de la Kwé dans les conditions les plus pessimistes et/ou défavorables pour des événements de période de retour 2, 10 et 20 ans. Cette étude fournit une modélisation conservatrice respectant les taux de sédimentation des sols perturbés. Les charges sédimentaires en crue ont été estimées sur la base de relations empiriques entre les concentrations de MES (Matières En Suspension) et le débit liquide, de façon similaire à la relation empirique développée par Danloux et Laganier en 1991, sur plusieurs bassins miniers en exploitation de Nouvelle-Calédonie. Les auteurs de cet article ont exprimé le flux sédimentaire en fonction du débit de crue au bassin de Ouenghi selon les résultats illustrés sur la Figure 51.



D'après Danloux et Laganier, 1991

Figure 51 : Relations entre le flux sédimentaire et le débit à la rivière de Ouenghi

A Goro, des relations similaires ont été développées en distinguant les sols non perturbés et les sols perturbés. Ces relations sont basées sur des données de terrain, des données régionales et des données issues de la littérature scientifique. L'estimation du flux de sédimentation annuel repose sur l'hypothèse de taux d'érosion de 0,3 mm/an pour les sols non perturbés et de 30 mm/an pour les sols perturbés. Considérant une densité volumique des sédiments de 1,2 t/m³, le flux d'érosion annuel est évalué à 360 t/ha/an pour les sols non perturbés et à 36 000 t/ha/an pour les sols perturbés. D'après les simulations, les probabilités de dépassement des bassins de la Kwé Ouest, Kwé Nord et Kwé Est sont respectivement de 18 %, 54 % et 19 % pour des concentrations supérieures à 50 mg/L et de 0 %, 1,9 % et 0,2 % pour des concentrations de 7 000 mg/L.

Les estimations de flux solides ont été réalisées sur les trois branches de la Kwé (Ouest, Nord et Est) pour des crues de période de retour 2, 10 et 20 ans. Le Tableau 16 synthétise les résultats en terme de transport solide (MES), de volume ruisselé sur 72h (Vruiss) et de débit de pointe (Qp).

Tableau 16 : Estimation du transport solide sur la Kwé

	Kwé Ouest (BV=18,31 km ²)			Kwé Nord (BV=11,72 km ²)			Kwé Est (BV=3,09 km ²)		
	MES (tonnes)	Vruiss (Mm ³)	Qp (m ³ /s)	MES (tonnes)	Vruiss (Mm ³)	Qp (m ³ /s)	MES (tonnes)	Vruiss (Mm ³)	Qp (m ³ /s)
2 ans	23 834	4,23	100	233 895	2,89	80	378	0,03	0,6
10 ans	65 980	6,51	187	659 423	4,51	160	1 046	0,039	1,11
20 ans	109 647	8,11	233	1 086 600	5,55	200	1 739	1,74	1,39

Source : Golder, 2002c

Les résultats montrent une forte prépondérance des flux solides sur le bassin de la Kwé Nord, lesquels sont environ dix fois supérieurs à ceux de la Kwé Ouest pour un bassin versant 3,8 fois plus petit. Ramené à l'unité surfacique, le flux sédimentaire de la Kwé Nord est 15 fois supérieur à celui de la Kwé Ouest. Le flux sédimentaire de la Kwé Est est largement inférieur à celui des autres bassins, ce qui s'explique par l'importance des travaux effectués sur le bassin de la Kwé Nord par rapport aux autres bassins selon le projet datant de 2002.

ETUDE LANDLOCH 2004

L'étude Landloch (2004) avait pour objectif d'améliorer la robustesse des estimations préliminaires de taux d'érosion et de flux sédimentaire sur le projet de Goro. Les travaux entrepris pour atteindre cet objectif ont consisté en :

- des simulations pluie-débit pour l'analyse du ruissellement et de l'érosion de terrain ;
- des mesures de vitesse de sédimentation des particules solides du site ;
- la modélisation de l'érosion et des flux sédimentaires de Goro basée sur la collecte de données de terrain.

Les simulations ont montré que l'exposition de limonite à la surface pendant un certain temps peut entraîner une réduction importante de l'érosion. La vitesse à laquelle l'érosion diminue n'est pas bien définie, les observations suggèrent que le changement important se produit dans les trois mois.

La production de sédiments provenant des pistes est clairement associée à la circulation des véhicules et potentiellement à la fréquence du passage de véhicules.

Les résultats de l'étude sont synthétisés dans le Tableau 17. Le flux sédimentaire annuel a été estimé en fonction des superficies de limonite exposée et des routes primaires et secondaires (différenciant le trafic lourd des camions et le celui des véhicules légers).

Tableau 17 : Estimation du flux sédimentaire annuel de la Kwé [Landloch, 2004]

Nom du sous-bassin versant	Superficie (ha)	Limonite exposée		Routes primaires		Routes secondaires		Total Erosion (t/an)
		Superficie (ha)	Erosion (t/an)	Longueur (km)	Erosion (t/an)	Longueur (km)	Erosion (t/an)	
Kwé Est	313	37	906	38	229	1	32	1166
Kwé Nord	1160	70	1362	131	789	24	715	2866
Kwé Ouest	1817	94	4244	73	437	30	898	5579
TOTAL	3290	201	6512	242	1455	55	1645	9612

Il est malheureusement difficile de comparer ces résultats à ceux de l'étude précédente du fait d'une simulation continue du flux sédimentaire alors que celui des études précédentes avait été réalisé en événementiel pour les fortes crues. Toutefois, on note que les tendances entre les bassins de la Kwé Ouest et Nord se sont inversées, les différences de flux sédimentaires sont cependant moins fortes. Cette différence de résultats sur les bassins de la Kwé Nord et de la Kwé Ouest peut s'expliquer par l'évolution du projet minier entre 2002 et 2004.

ETUDE GOLDER 2011

L'étude de Golder 2011 avait pour objectif de valider et de quantifier les données qualitatives et quantitatives des eaux de surface acquises par les différentes stations entre 2003 et 2011, prélude à leur interprétation et leur mise en perspective. Elle comprend :

- la description du processus de validation des données de pluviométrie, de débit et de suivi physicochimique ;
- l'interprétation des résultats sous forme d'une synthèse hydrologique sommaire des secteurs étudiés afin de pouvoir définir l'évolution générale de la qualité et des quantités d'eau ;
- l'analyse simplifiée des comportements et des tendances entre l'évolution temporelle du fonctionnement hydrogéochimique et l'évolution géomorphologique des secteurs communiquée par VNC à la date de réalisation du rapport.

D'après les analyses conduites, les quantités de matière relarguées semblent être corrélées à la durée et à l'intensité des épisodes pluvieux, et donc, aux variations saisonnières. On remarque en effet que plus le volume du ruissellement est important, plus la valeur des paramètres suivis (MES et turbidité) augmente. De même, on remarque que les pics de concentration sont synchrones aux événements pluvieux et, de ce fait, aux débits mesurés. Le relargage de matières par lessivage, ruissellement et érosion est immédiat dès l'apparition de la pluie.

Des analyses comparant les volumes de ruissellement et la quantité de MES observés lors des épisodes de crues aux stations KAL et KNL ont montré que le volume total de MES relargué par bassin dépendait non seulement de la taille du bassin versant mais aussi et surtout des activités et des aménagements réalisés sur ce même bassin. Certaines différences de quantité de MES générées lors des crues, ramenées par unité de surface à chaque bassin versant (c'est-à-dire aux stations KAL et KNL), sont attribuées au bassin de la Kwé Ouest où est actuellement réalisée la majeure partie des aménagements liés à la construction du bassin de stockage des résidus.

A l'heure actuelle, les ouvrages de gestion des eaux installés en aval du test minier semblent assurer un rôle protecteur sur la Kwé Nord. Une attention particulière sera portée sur le suivi qualitatif et quantitatif de ce secteur en raison de l'activité minière.

Bilan du transport sédimentaire à Goro

De nombreuses analyses sur les MES ont été réalisées par le département Environnement de VNC. Ces analyses ont surtout été conduites au cours de la période récente avec une fréquence d'échantillonnage suffisante pour faire une analyse du transport solide en crue sur le site de Goro en fonction des volumes ruisselés et des débits de pointe de crue.

Le Tableau 18 présente les caractéristiques de crue et de transport solide généré au cours de 26 épisodes observés à la station KAL, avec les dates de début et de fin de crue, la durée de l'épisode en nombre de jours, le débit de pointe Q_p , le volume ruisselé V , le débit moyen de crue Q_{moy} , le poids total des MES, le flux sédimentaire et la concentration maximale C_{max} .

Les données soulignées correspondent aux crues maximales annuelles considérées pour l'analyse fréquentielle des crues. On constate que pendant la majorité de ces crues qui ont eu lieu entre 2006 et 2013, des données de MES ont été échantillonnées.

La Figure 52 illustre la relation entre les caractéristiques de crue (débit de pointe et débit moyen) et le flux sédimentaire. Les deux échantillons ont été ajustés à des lois puissance. Les relations obtenues montrent des coefficients de corrélation assez significatifs et robustes.

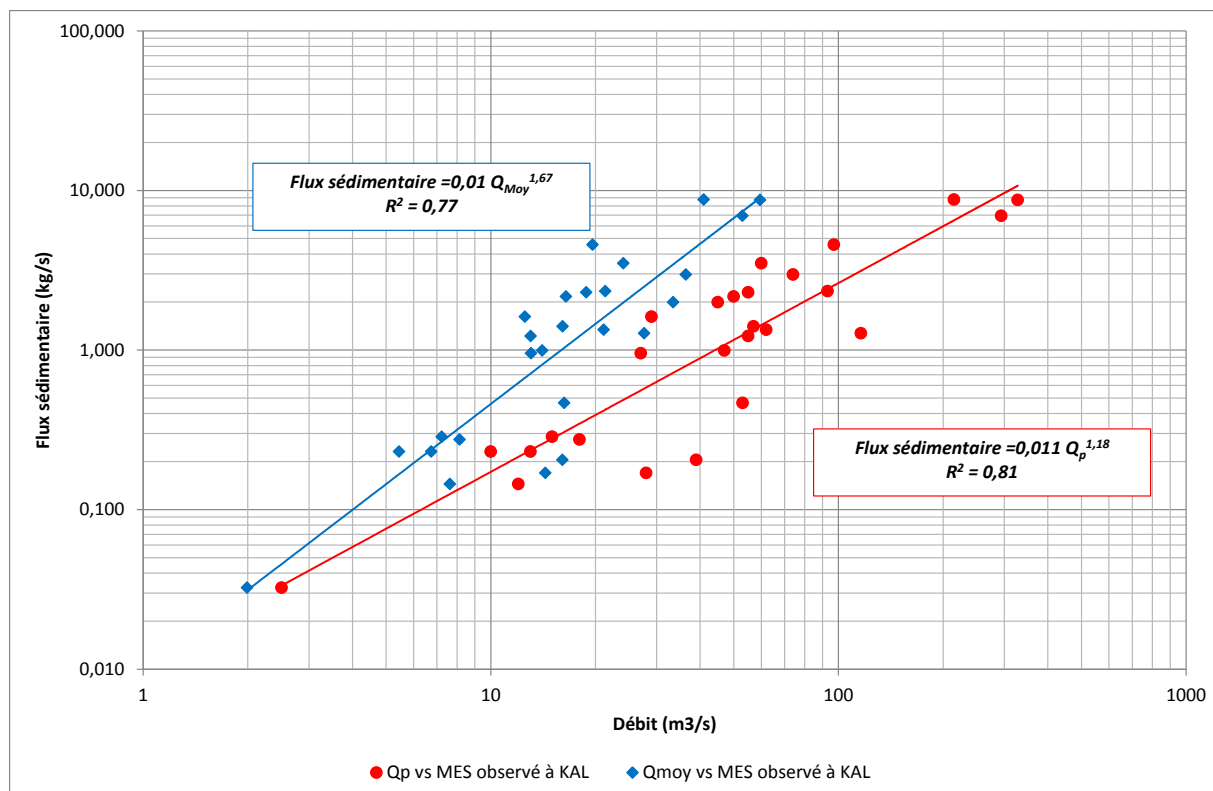


Figure 52 : Analyse des relations entre caractéristiques de crue et flux sédimentaire, station KAL

De manière générale, on ne constate pas d'évolution particulière des flux sédimentaires au fil des années à la station KAL. De fortes charges sédimentaires sont observées pour les crues les plus fortes, la charge sédimentaire ayant excédé 1 000 tonnes de MES au cours de 4 épisodes de crues majeurs (2008, janvier et décembre 2011 et 2013). Les périodes de retour associées à ces événements sont comprises entre 5 et 28 ans. De même, les concentrations maximales de MES ne montrent pas de tendance particulière à l'évolution.

Une analyse du flux sédimentaire a été conduite de façon similaire à la station KNL. Les données relatives aux caractéristiques de crue et de transport solide généré au cours de 24 épisodes de crue sont présentées dans le Tableau 19. Aucune donnée n'a été enregistrée sur la période de juillet 2008 à janvier 2011. La crue de juillet 2013 présente la plus forte charge sédimentaire enregistrée à cette station, la deuxième plus forte charge ayant été observée pendant l'épisode Vania. De manière générale, on constate là aussi que ce sont les crues les plus fortes qui induisent les plus fortes charges sédimentaires.

La Figure 53 présente la relation entre les débits de pointe et moyen d'une part et la charge sédimentaire, d'autre part, à la station KNL. Les relations établies présentent des coefficients de corrélation assez robustes.

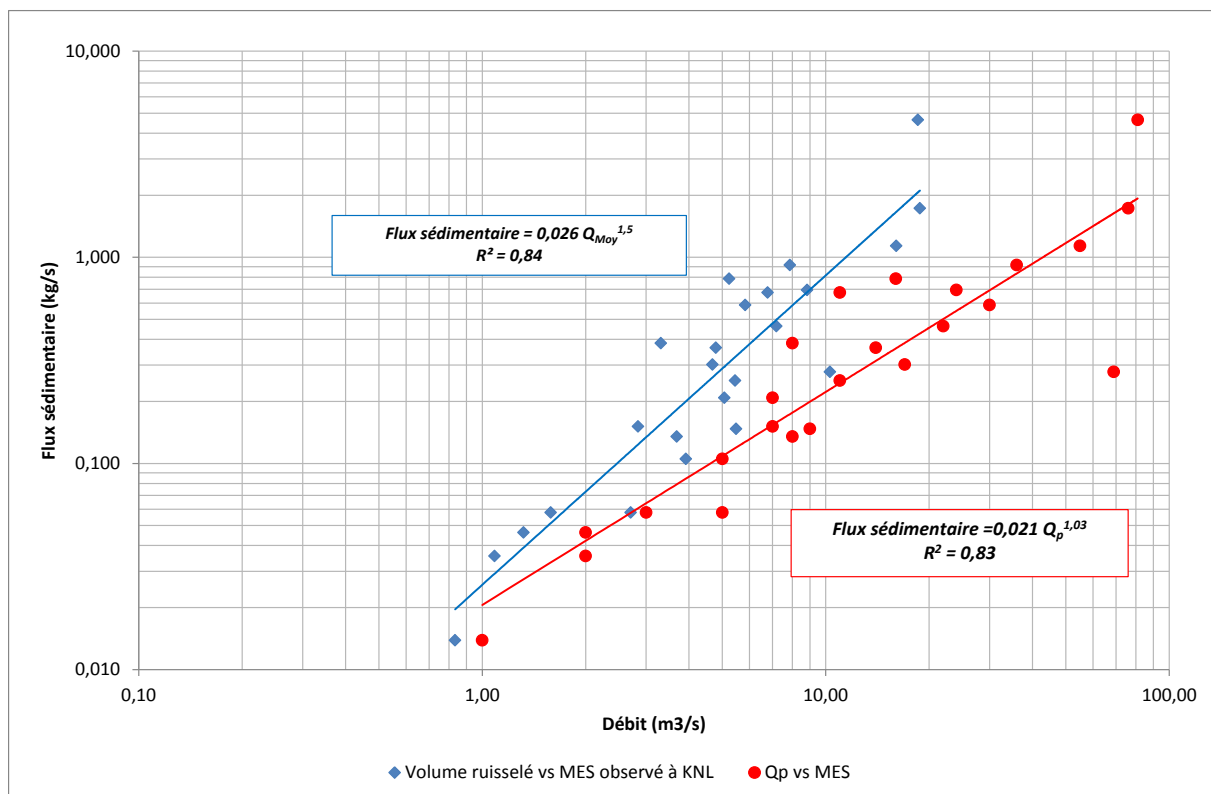


Figure 53 : Analyse des relations entre caractéristiques de crue et flux sédimentaire, station KNL

Une comparaison des épisodes concomitants de crue, pendant lesquels des données MES ont pu être recueillies, montre que la charge sédimentaire de la station KNL représente 12 (2012) à 65 % (2006) de la charge sédimentaire à la station KAL. En valeur médiane, la charge sédimentaire au droit de la station KNL représente 33 % de la charge sédimentaire observée au niveau de la station KAL, soit le prorata de la superficie des bassins versants.

Etant donné que la majorité des activités minières sont situées sur le bassin de la Kwé Nord, on peut considérer que les bassins de sédimentation placés au plus proche des activités productrices de particules d'érosion ainsi que BSKN jouent effectivement leur rôle filtrant vis-à-vis de l'aval de la rivière. De telles analyses doivent être poursuivies afin de contrôler le suivi de la charge sédimentaire sur le bassin de la Kwé. Elles pourront constituer une base au dimensionnement des futurs ouvrages hydrauliques du site.

Tableau 18 : Caractéristiques de crue et flux sédimentaires aux stations KAL et KNL

Date début	Date fin	Nb de jours	Qp (m³/s)	V ruisselé (Mm³)	Qmoy (m³/s)	MES (tonnes)	Flux sédimentaire (kg/s)	Cmax (mg/l)
STATION KAL								
31/01/2006 08:00	01/02/2006 16:00	1,3	13	0,612	5,45	26	0,231	134
<u>28/02/2006 04:00</u>	<u>02/03/2006 09:00</u>	<u>2,2</u>	<u>62</u>	<u>4,017</u>	<u>21,13</u>	<u>255</u>	<u>1,342</u>	<u>337</u>
23/03/2006 22:00	24/03/2006 11:00	0,5	10	0,291	6,74	10	0,231	177
18/09/2006 21:00	19/09/2006 10:00	0,5	2,5	0,086	1,99	1,4	0,032	37
28/06/2007 18:00	29/06/2007 12:00	0,8	60	1,662	24,05	242	3,501	360
<u>25/08/2007 00:00</u>	<u>27/08/2007 00:00</u>	<u>2</u>	<u>93</u>	<u>3,688</u>	<u>21,34</u>	<u>404</u>	<u>2,338</u>	<u>372</u>
06/09/2007 16:00	09/09/2007 22:00	3,3	47	4,005	14,05	283	0,993	310
02/12/2007 14:00	05/12/2007 00:00	2,4	18	1,687	8,14	57	0,275	135
17/02/2008 16:00	20/02/2008 23:00	3,3	57	4,59	16,10	401	1,406	398
07/03/2008 04:00	10/03/2008 04:00	3	97	5,085	19,62	1187	4,579	1100
31/03/2008 23:00	03/04/2008 11:00	2,5	55	4,065	18,82	497	2,301	425
16/05/2008 12:00	17/05/2008 18:00	1,3	50	1,849	16,46	243	2,163	370
05/07/2008 04:00	06/07/2008 00:00	0,8	12	0,527	7,62	10	0,145	68
26/09/2008 21:00	27/09/2008 19:00	0,9	29	0,975	12,54	126	1,620	480
06/02/2009 13:00	08/02/2009 18:00	2,2	39	3,055	16,07	39	0,205	41
21/03/2009 16:00	22/03/2009 02:00	0,4	27	0,451	13,05	33	0,955	130
<u>24/03/2009 10:00</u>	<u>27/03/2009 12:00</u>	<u>3,1</u>	<u>53</u>	<u>4,357</u>	<u>16,27</u>	<u>125</u>	<u>0,467</u>	<u>140</u>
<u>28/03/2010 07:34</u>	<u>30/03/2010 09:16</u>	<u>2,1</u>	<u>55</u>	<u>2,364</u>	<u>13,03</u>	<u>222</u>	<u>1,224</u>	<u>420</u>
<u>12/01/2011 12:44</u>	<u>15/01/2011 12:27</u>	<u>3</u>	<u>294</u>	<u>13,718</u>	<u>52,92</u>	<u>1798</u>	<u>6,937</u>	<u>280</u>
24/12/2011 19:00	27/12/2011 02:00	2,3	215	8,146	40,99	1745	8,781	810
02/02/2012 15:01	04/02/2012 02:01	1,5	28	1,859	14,34	22	0,170	30
<u>12/03/2012 19:19</u>	<u>16/03/2012 06:56</u>	<u>3,5</u>	<u>116</u>	<u>8,351</u>	<u>27,62</u>	<u>385</u>	<u>1,273</u>	<u>120</u>
05/03/2013 05:00	05/03/2013 14:00	0,4	45	1,156	33,45	69	1,997	170
28/03/2013 10:00	30/03/2013 02:00	1,7	15	1,062	7,23	42	0,286	140
24/05/2013 23:00	25/05/2013 14:00	0,6	74	1,887	36,40	154	2,971	200
<u>02/07/2013 15:00</u>	<u>04/07/2013 16:00</u>	<u>2</u>	<u>328</u>	<u>10,282</u>	<u>59,50</u>	<u>1506</u>	<u>8,715</u>	<u>360</u>
STATION KNL								
31/01/2006 08:00	01/02/2006 16:00	1,3	7	0,319	2,84	17	0,151	134
<u>28/02/2006 04:00</u>	<u>02/03/2006 09:00</u>	<u>2,2</u>	<u>22</u>	<u>1,365</u>	<u>7,18</u>	<u>88</u>	<u>0,463</u>	<u>337</u>
23/03/2006 22:00	24/03/2006 11:00	0,5	2	0,057	1,32	2	0,046	177
18/09/2006 21:00	19/09/2006 10:00	0,5	1	0,036	0,83	0,6	0,014	37
24/11/2006 20:00	26/11/2006 04:00	1,3	2	0,122	1,09	4	0,036	96
05/03/2007 16:00	06/03/2007 06:00	0,6	11	0,351	6,77	35	0,675	184
29/03/2007 14:00	30/03/2007 16:00	1,1	5	0,372	3,91	10	0,105	132
28/06/2007 12:00	29/06/2007 11:00	1	16	0,452	5,23	68	0,787	360
25/08/2007 00:00	27/08/2007 14:00	2,6	30	1,309	5,83	132	0,588	372
06/09/2007 16:00	09/09/2007 22:00	3,3	17	1,335	4,68	86	0,302	310
02/12/2007 14:00	05/12/2007 00:00	2,4	8	0,764	3,68	28	0,135	135
21/12/2007 14:00	21/12/2007 22:00	0,3	3	0,041	1,58	1,5	0,058	77
16/02/2008 16:00	20/02/2008 02:00	3,4	14	1,407	4,79	107	0,364	398
02/03/2008 20:00	03/03/2008 23:00	1,1	11	0,518	5,45	24	0,253	161

Date début	Date fin	Nb de jours	Qp (m ³ /s)	V ruisselé (Mm ³)	Qmoy (m ³ /s)	MES (tonnes)	Flux sédimentaire (kg/s)	Cmax (mg/l)
31/03/2008 23:00	03/04/2008 11:00	2,5	36	1,698	7,86	198	0,917	425
06/04/2008 00:00	09/04/2008 16:00	3,7	69	3,288	10,29	89	0,278	80
19/04/2008 12:00	20/04/2008 14:00	1,1	9	0,521	5,48	14	0,147	170
16/05/2008 12:00	17/05/2008 18:00	1,3	8	0,372	3,31	43	0,383	370
05/07/2008 04:00	06/07/2008 00:00	0,8	5	0,187	2,71	4	0,058	68
<u>13/01/2011 14:00</u>	<u>15/01/2011 13:00</u>	<u>2</u>	<u>76</u>	<u>3,249</u>	<u>18,80</u>	<u>299</u>	<u>1,730</u>	<u>270</u>
13/03/2012 18:00	14/03/2012 13:00	0,8	24	0,61	8,83	48	0,694	250
01/01/2013 18:00	03/01/2013 22:00	2,2	55	3,05	16,05	216	1,136	120
14/04/2013 00:00	14/04/2013 13:00	0,5	7	0,219	5,07	9	0,208	120
<u>02/07/2013 04:00</u>	<u>04/07/2013 00:00</u>	<u>1,8</u>	<u>81</u>	<u>2,885</u>	<u>18,55</u>	<u>721</u>	<u>4,636</u>	<u>380</u>

5.2.8 Qualité biologique des rivières

 Voir Atlas Carte D12 - Réseau hydrographique

5.2.8.1 Etat initial

Etudes de référence

Les rapports ayant permis d'établir la richesse biologique des cours d'eau sont les suivants :

- Pöllabauer C, 1992. Etude de gestion rationnelle de la faune aquacole, I. Bases de connaissances et inventaire 1 des rivières de la Province Sud. Agence concept, pour Province Sud NC, service de l'environnement. 102p.
- Pöllabauer C, 1995. Etude de gestion rationnelle de la faune aquacole, II. Inventaire 2 des rivières de la Province Sud. Agence concept, pour Province Sud NC, service de l'environnement. 8p.
- Pöllabauer C, 1997a. Etude de gestion rationnelle de la faune aquacole, III. Poissons de rivière de Nouvelle-Calédonie. Les espèces d'un intérêt halieutique. Erbio, pour Province Sud NC, Service de l'environnement. 45p.
- Pöllabauer C, 1997b. Conserving the freshwater fish fauna of New Caledonia. *In* : ORSTOM, Nouméa, NCL (éd) – 5th Indo-Pacific fish conférence 03-08 november 1997 : abstracts. P.83.
- Pöllabauer C, 1999a. Le milieu fluvio-lacustre de 4 rivières dans le sud de la Grande Terre : Kwé, Trou Bleu, Wadjana et Creek de la Baie Nord. Etude d'impact. *Erbio*.
- Pöllabauer C, 1999b. Faune ichtyologique et carcinologique de Nouvelle-Calédonie. Rapport final de l'inventaire des cours d'eau de la Province Sud. Erbio, pour la Province Sud NC, Direction des Ressources Naturelles. Juillet. 183p.
- Pöllabauer C, 1999c. Inventaire faunistique de la doline de l'usine pilote Goro Nickel et du déversoir. *Erbio*.
- Erbio, 2005, rapport de synthèse d'Erbio sur les écosystèmes d'eau douce, 2005 ;
- BIOIMPACT, 2012, l'état écologique de la Kwé, « étude basée sur les données historiques du suivi environnemental », BioIMPACT, 2012 ;
- ERBIO, 2010, Inventaire de 6 zones humides - Rapport final - Version préliminaire. Erbio, juillet 2010
- ERBIO, 2011a, Etude de suivi macrobenthique, ichtyologique et carcinologique du bassin versant KWE Ouest 4 - Campagne d'Avril 2011. Erbio, juillet 2011.

- ERBIO, 2011b, Etude de suivi macrobenthique, ichtyologique et carcinologique du bassin versant KWE Ouest 5 - Campagne d'Avril 2011. Erbio, aout 2011.
- ERBIO, 2012a, étude de suivi ichtyologique et carcinologique du creek de la Baie Nord, de la Kwé, de la Kuébini et de la Truu - campagne de janvier-février 2012, Erbio, 2012a ;
- ERBIO, 2012b, étude de suivi ichtyologique et carcinologique du creek de la Baie Nord, de la Kwé, de la Kuébini et de la Truu - campagne de juin 2012. Erbio, 2012b.

5.2.8.2 Caractérisation de la faune d'eau douce

Jusqu'au début des années 1990, la connaissance de la faune ichtyologique d'eau douce en Nouvelle-Calédonie n'était que partielle. Ce sont les travaux de C. Pöllabauer (1992, 1995, 1997, 1999) et les prospections intensives menées dans le cadre des missions « CHLOE » dans les 3 provinces entre 1997 et 2002, qui ont permis d'avoir une vision plus complète des peuplements de l'ensemble des rivières du territoire et d'établir une liste des espèces présentes.

Au total, 103 espèces de poissons d'eau douce appartenant à 39 familles différentes ont été identifiées en Nouvelle-Calédonie. 90 espèces sont autochtones dont 10 endémiques appartenant à 6 familles différentes (Pöllabauer).

Dans les cours d'eau calédoniens, les familles dominantes en termes d'effectif sont généralement les Kuhlidae (carpes), les Eleotridae (lochons) et les Gobiidae (gobies) (Erbio, 2012). Plusieurs espèces de poissons ont un statut d'espèce menacée selon les critères de l'UICN.

L'anguille *Galaxias neocaledonicus* dispose d'un statut particulier dans la mythologie mélanésienne. C'est également un indicateur des anciennes affinités entre les poissons de Nouvelle Zélande et d'Australie.

La macrofaune benthique des rivières calédoniennes est dominée par les insectes. Sur l'ensemble des espèces d'insectes aquatiques connues, plus de 75 % d'entre elles seraient endémiques à la Nouvelle-Calédonie. Notamment, l'endémisme est proche de 100 % chez les éphéméroptères et les trichoptères. Les milieux les plus propices au développement de la macrofaune benthique et qui présentent la diversité spécifique maximale sont les ruisseaux forestiers, plus riches en matières organiques. Les communautés de macro-invertébrés se distinguent en deux principaux groupes (Pöllabauer & Bargier, 2005) :

- les macro-invertébrés benthiques, situés sur le fond, comprennent des groupes tels que les larves d'odonates (larves de libellules), les mollusques, trichoptères, des vers, etc.;
- les macro-invertébrés pélagiques et de surface tels que les hétéroptères (punaises aquatiques), les coléoptères ou encore les acariens qui restent une partie du temps en surface ou font des va-et-vient entre la surface et le fond.

Dans la région de Goro on distingue 3 types d'habitat d'eau douce :

- les milieux lotiques (eaux courantes) ;
- les milieux lenticules (eaux calmes) permanents ;
- les milieux lenticules (eaux calmes) périodiques.

L'ichtyofaune des lacs et des rivières du Sud calédonien est composé d'un total de 39 espèces de poissons recensées à l'état initial, dont 5 espèces endémiques, essentiellement dans les rivières. Les différents habitats rencontrés sur les rivières de la région de Goro et leur qualité sont illustrés par le Tableau 19.

Tableau 19 : Qualité des habitats des principales rivières du secteur de Goro

Qualité de l'habitat		Faciès lotique		Faciès lentique				
		Eaux courantes rapides	Eaux courantes lentes	Plus d'un mètre de profondeur		Moins d'un mètre de profondeur		
		Blocs de roche %	Gravier, sable %	Sable, vase %	Blocs de roche %	Bois, racines, végétaux %	Feuilles, détritiques %	Gravier, sable %
Kuébini	FW1	20	20	25	20	3	2	10
	FW11	30	10	5	30	3	2	20
	FW12	50	20		15	5		10
Wajana	FW6	60	15	5	5	2	2	11
	FW13	25	30	20		5		20
Kwé principale	FW17	50	20	5	15			10
	FW3	35	35	10	10			10
	FW14	15	30	20	10	10	5	10
Kwé Ouest	FW4	20		35	25	10		10
Kwé Nord	FW15	40	20	10	5	5	5	15
	FW16	50	20	5	5			20
Trou bleu	FW2	55	10	5	20	5	5	

Qualité d'habitat :  Excellent  Bon  Moyen  Mauvais

Source : Erbio 2005

▪ Les habitats lotiques (rivières)

Ils sont rencontrés sur les rivières Kuébini, Wajana, Kwé et Trou bleu, la qualité du milieu en tant qu'habitat pour la faune d'eau douce a été caractérisée pour chaque rivière.

Les travaux d'établissement de l'état initial de la faune des rivières se sont déroulés de 1994 à 2000. En raison des techniques de prélèvement employées (pêche électrique ou filet), l'échantillonnage des communautés d'invertébrés s'est limité, pour la plupart des études, aux plus grands organismes de macro-invertébrés, sans distinction entre les organismes en dérive et les organismes benthiques.

Tableau 20 : Synthèse des travaux réalisés sur l'ichtyofaune et les invertébrés (état initial)

Date	Expertise	Lieu	Richesse spécifique observée	Espèces les plus abondantes observées
Synthèse des travaux réalisés sur les poissons (Ichtyofaune)				
1995	SNC-Lavalin	Kwé	non déterminée	mulet noir (<i>Cestraeus plicatilis</i>) carpe aux gros yeux (<i>Kuhlia rupestris</i>)
1993-1996	SNC-Lavalin	Kwé, Wajana, Trou Bleu	19 espèces dont 9 au statut indéterminé	
1996-1998	Erbio	Kwé, Wajana, Trou Bleu, Creek de la Baie Nord	26 espèces de 11 familles dont 3 endémiques y compris <i>Protogobius attiti</i>	
2000	Rescan	Kwé, Kuébini, Wajana, Trou bleu, Creek de la Baie Nord, rivière Carénage	14 espèces de 9 familles 4 espèces endémiques 1 espèce introduite (<i>Oreochromis mossambicus</i>)	carpe à queue jaune (<i>Kuhlia munda</i>) carpe aux gros yeux (<i>Kuhlia rupestris</i>)
Synthèse des travaux réalisés sur les invertébrés				
1995	SNC-Lavalin	Kwé	3 espèces (1 gastéropode non identifié, un pagure et une espèce non identifiée de <i>Macrobrachium</i>)	
1996	SNC-Lavalin	Kwé, Trou Bleu, Wajana	5 espèces (<i>M. aemulum</i> , <i>M. caledonicum</i> , <i>M. lar</i> , <i>M. latimanus</i> crabe d'eau douce <i>Varuna litterata</i>)	crevette d'eau douce <i>Macrobrachium</i>
1998-2004	Erbio	Kwé, la Trou Bleu, la Wajana et le Creek de la Baie Nord	11 espèces de 3 familles 4 espèces de <i>Macrobrachium</i> de la famille des Palaemonidae (<i>lar</i> , <i>aemulum</i> , <i>caledonicum</i> et <i>latimanus</i>) 4 espèces de crevette <i>Paratya</i> (<i>bouvieri</i> , <i>caledonica</i> , <i>intermedia</i> et <i>typa</i>) 2 espèces de crevette <i>Caridina</i> (<i>imitatrix</i> et <i>novaealedoniae</i>) 2 espèces de crabe d'eau douce (<i>Odiomaris pilosus</i> et <i>Varuna litterata</i>)	
2000	Rescan	Kwé, Carénage	42 espèces au total	

Les poissons

Globalement, les communautés de poissons des rivières du secteur de Goro sont caractérisées par des densités faibles, une proportion non négligeable d'espèces endémiques et sont toutes amphidromes.

Les espèces endémiques sont généralement peu abondantes dans les rivières en Nouvelle-Calédonie car elles sont restreintes à des microhabitats spécifiques limitant leur distribution. Elles sont donc très sensibles aux variations naturelles ou anthropiques de l'environnement (espèces sensibles et indicatrices) Erbio, 2012).

La liste des espèces de poissons recensées à l'état initial (jusqu'en 2007) dans les rivières Kwé et Trou bleu est présentée dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Ichtyofaune recensée dans les rivières Kwé et Trou bleu

Famille	Espèce	Répartition	Rivière Kwé	Rivière Trou bleu
ACANTHURIDAE	Acanthurus blochii			
ANGUILLIDAE	Anguilla australis	Pacifique		
	Anguilla marmorata	Indo-Pacifique	(1) (2) (6)	(1) (2) (6)
	Anguilla megastoma	Pacifique		(2) (6)
	Anguilla obscura	Pacifique		(2) (6)
	Anguilla reinhardti	Pacifique	(1) (2)	(1) (2) (6)
APOGONIDAE	Apogon amboinensis	Pacifique		
CARCHARHINIDAE	Carcharhinus Leucas	Indo-Pacifique	(2)	
CICHLIDAE	Oreochromis mossambicus	Introduit		(3)
ELEOTRIDAE	Eleotris fusca	Indo-Pacifique	(6)	(6)
	Eleotris melanosoma (5)	Indo-Pacifique	(2) (3)	(1) (2) (3) (6)
	Ophieleotris aporos	Indo-Pacifique	(2)	(2)
	Ophiocara porocephala	Indo-Pacifique		
GERREIDAE	Gerres filamentosus	Indo-Pacifique		
GOBIIDAE	Awaous guamensis	Pacifique	(1) (2) (3) (6)	(1) (2) (3) (6)
	Glossogobius celebius	Pacifique		
	Periophthalmus argentilineatus	Indo-Pacifique	(2)	(2)
	Redigobius bikolanus	Pacifique		(2) (3)
	Redigobius chrysosoma	Pacifique		(2)
	Schismatogobius fuligineus	Endémique		(6)
	Sicyopterus lagocephalus	Indo-Pacifique		(6)
	Sicyopterus sarasini	Endémique	(2)	(2)
	Sicyopterus sp.	-		(2)
	Stenogobius yateiensis	Endémique		(3)
KUHLIDAE	Kuhlia marginata	Pacifique	(2)	(1) (2) (6)
	Kuhlia munda	Pacifique	(2) (6)	(1) (2) (3) (6)
	Kuhlia rupestris	Indo-Pacifique	(1) (2) (3) (6)	(1) (2) (3) (6)
LUTJANIDAE	Lutjanus argentimaculatus	Indo-Pacifique	(2)	(3) (6)
	Lutjanus russelli	Indo-Pacifique		
MICRODESMIDAE	Parioglossus neocaledonicus	Endémique		
MORINGUIDAE	Moringua microchir	Indo-Pacifique		
MUGILIDAE	Cestraeus oxyrhynchus	Pacifique	(1) (2)	
	Cestraeus plicatilis	Pacifique	(1) (2) (3) (6)	(1) (2) (3) (6)
	Crenimugil crenibalis	Indo-Pacifique		(6)
RHYACICHTHYDAE	Protogobius attiti	Endémique	(2) (6)	(2) (6)
SPARIDAE	Acanthopagrus berda	Indo-Pacifique		
SPHYRAEIDAE	Sphyræna barracuda	Cosmopolite		
SYNGNATHIDAE	Microphis brachyurus brachyurus	Indo-Pacifique		
TERAPONIDAE	Terapon jarbua	Indo-Pacifique	(2)	
TOTAL ESPECES			17	24
TOTAL ENDEMIQUES			2	3

(1) Espèces recensées entre déc.1995 et oct.1996 (SNC-Lavalin)

(2) Espèces recensées entre jan.1996 et déc.1998 (Pöllabauer)

(3) Espèces recensées entre avril et août 2000 (Rescan)

(4) Espèces recensées de 1996 à 2004 (Pöllabauer & Bargier)

(5) En jaune : espèces répertoriées pour la pêche sportive et de subsistance

(6) Espèces recensées en juin 2007 (Pöllabauer, 2007)

6 espèces sont inscrites sur la liste des espèces protégées de poissons dulçaquicoles de la province Sud. Il s'agit d'*Ophieleotris aporos* (Eleotridae) ainsi que toutes les espèces endémiques.

Les Crustacés

Parmi les crustacés inventoriés, on note que les rivières ont une diversité de 8 à 12 espèces. Les espèces de crevettes (famille des Atyidae) présentes sont protégées en province Sud.

Tableau 22 : Crustacés décapodes recensés dans les rivières du secteur de Goro (état initial)

Famille	Espèce	Rivière Kwé	Rivière Wajana	Rivière Trou bleu
Atyidae	Caridina imitatrix	X	X	X
	Caridina novaecaledoniae	X	X	X
	Paratya bouvieri	X	X	X
	Paratya caledonica	X	X	X
	Paratya intermedia	X	X	X
	Paratya typa	X	X	X
Geocarcinidae	Odiomaris pilosus			X
Grapsidae	Varuna litterata			X
Palaemonidae	Macrobrachium aemulum	X	X	X
	Macrobrachium caledonicum	X		X
	Macrobrachium latimanus			X
	Macrobrachium lar		X	X

Les macro-invertébrés

Les connaissances concernant l'écologie et la systématique des macroinvertébrés benthiques de la zone d'étude sont encore parcellaires. Toutefois, des indicateurs de qualité biologique ont été mis en place afin de permettre une détection de pollution organique (IBNC) ou sédimentaire (IBS) à partir des communautés de macro-invertébrés.

Les stations sur lesquelles des IBNC ont été calculés, qui correspondent à un état initial et qui concernent l'activité minière sont la Kwé Principale (station 1-E) et la rivière périphérique Kadji (station 5-E), positionnées sur la carte de la Figure 54.

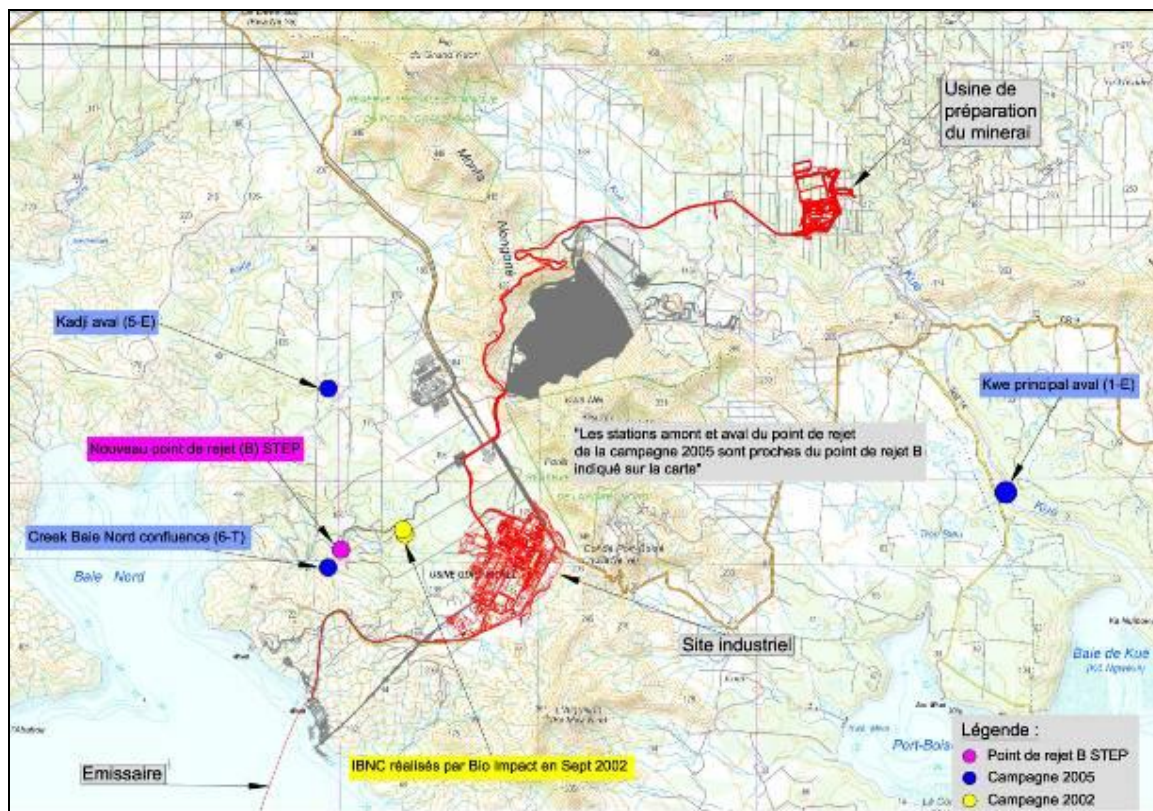


Figure 54 : Stations de suivi des indices biotiques

Les valeurs de l'indice IBNC déterminées pour la Kwé Principale donnent une qualité des eaux variant de bonne à passable entre 2005 et 2006.

Tableau 23 : Résultats des campagnes de suivi des indices biotiques

Rivière	Station	Dates	IBNC	Qualité biologique de l'eau
Kwé principale	Station 1E	février 2005	6,25	Bonne
		août 2006	5,38	Passable
Kadji	Station 5E	février 2005	5,80	Bonne
		août 2006	5,21	Passable

Note : la campagne de 2002 ayant été réalisée à une période de l'année différente et sur des stations relativement éloignées de celles de 2005/2006, il est difficile de comparer directement les résultats.

5.2.8.3 Suivi des cours d'eau

 Voir Atlas Carte D11 - Stations de suivi hydrobiologique

5.2.8.3.1 Suivi de la faune ichthyenne et carcinologique de la Kwé et des rivières périphériques

La rivière Kwé est suivie depuis 1995. De 1995 à 2012, un total de 15 campagnes a été réalisé dans les 4 branches de la Kwé (Kwé Principale et ses 3 affluents, Kwé Ouest, Kwé Est et Kwé Nord). Les inventaires effectués en 1995, 1996 et 1997 sont des suivis qualitatifs (présence-absence) de la faune ichthyologique sur divers tronçons et ont permis d'établir l'état initial de la faune d'eau douce (voir paragraphe 5.1.3).

En revanche, les 12 campagnes menées de 2000 à 2012 sur la rivière Kwé sont des suivis quantitatifs et concernent des tronçons et des stations bien définis.

Tableau 24 : Historique du suivi de la faune d'eau douce depuis 2000

bassin versant	sous-bassin versant	station	mai 2000	août 2000	juin 2007	septembre 2007	janvier 2008	juin 2009	juin 2010	janvier 2011	avril 2011	juin 2011	janv-fev 2012	juin 2012
Kwé principale		KWP-70												
		KWP-40												
		KWP-10												
Kwé Ouest	Kwé Ouest	KWO-60												
		KWO-20												
		KWO-10												
	Kwé Ouest 4	KO4-10												
		KO4-20												
		KO4-50												
	Kwé Ouest 5	KO5-10												
		KO5-20												
		KO5-50												
Kwé Est		KWE-20												
		KWE-10												
Kwé Nord		KWN-40												
		KWN-10												

Source : Erbio, 2012

13 stations de suivi de la faune d'eau douce sont installées dans le périmètre de la zone d'étude, sur la Kwé Ouest et la Kwé Principale, mais aussi sur les rivières Trou Bleu, Wajana, Kué Byini et Truu (Tableau 25).

Tableau 25 : Localisation et description des points de suivi de la faune ichtyologique

Nom	Bassin Versant	Type de suivi	Fréquence	Raison d'être	RGNC 91 Est	RGNC 91 Nord
CBN-30	CBN	Suivi poisson	Annuelle	Arrêté n°890-2007/PS	491924.5	207746
CBN-70	CBN	Suivi poisson	Annuelle	Convention biodiversité	491242.2	208094.3
TBL-50	TB	Suivi poisson	Tous les 2 ans	Convention biodiversité	499477.5	207400.8
TBL-70	TB	Suivi poisson	Tous les 2 ans	Convention biodiversité	499469	207313.8
KO-20	KO	Suivi poisson	Annuelle	Convention biodiversité	496909	210585
KWP-10	KP	Suivi poisson	Annuelle	Convention biodiversité	499313.6	210881.4
KWP-70	KP	Suivi poisson	Annuelle	Convention biodiversité	501310	208180.4
KUB-50	Kuébini	Suivi poisson	Semestrielle	Mesure Compensatoire	502032	215188
KUB-40	Kuébini	Suivi poisson	Semestrielle	Mesure Compensatoire	501028	214810
KUB-60	Kuébini	Suivi poisson	Semestrielle	Mesure Compensatoire	503117	215400
WAD-40	Wajana	Suivi poisson	Tous les 2 ans	Mesure Compensatoire	503211	212009
WAD-50	Wajana	Suivi poisson	Tous les 2 ans	Mesure Compensatoire	503552	211740
WAD-70	Wajana	Suivi poisson	Tous les 2 ans	Mesure Compensatoire	504070	211496

Source : Erbio, 2011 et 2012

L'inventaire faunistique réalisé lors des suivis sur ces 13 stations porte sur les poissons et les crustacés. La méthode d'échantillonnage pour le suivi des poissons est la pêche électrique. Les caractéristiques mésologiques (type de milieu et physico-chimie) sont retranscrites lors de chaque campagne.

Le Tableau 26 présente quelques éléments comparatifs des résultats obtenus pour la faune ichtyologique et carcinologique de la Kwé Ouest et Principale et des rivières périphériques potentiellement concernées par le projet. On note que la rivière Wajana présente globalement les résultats les plus favorables sur l'ensemble de ces cours d'eau.

Les différences les plus notables se situent au niveau de l'abondance de la faune et notamment carcinologique (notée ici par le nombre d'individus à l'hectare) et de la proportion d'espèces endémiques dans les prises de poissons et de crustacés, soit 4,5 fois plus importante dans la Wajana que dans la rivière Kwé.

Tableau 26 : Résultats du suivi de la faune ichtyologique et carcinologique de juin 2012

Rivière	Trou bleu	Wajana	Kwé	Kuébini	Truu
Richesse spécifique poissons	16	18	16	15	11
Nbre d'espèces de poissons endémiques	3	4	3	3	1
Nbre de poissons/ha	1016	828	76	182	991
% espèces endémiques /effectif global capturé (poissons)	6,2	18,77	4	14,20	2,9
Richesse spécifique macro-invertébrés (crevettes et crabes)	6	7	7	5	2
Nb d'espèces de macro-invertébrés endémiques	2	2	4	3	0
Nbre de macro-invertébrés/ha	1732	4204	559	261	131
% espèces endémiques/effectif global capturé (macro-invertébrés)	0,33	0,56	0,12	0,25	0

Source : Erbio, 2012

5.2.8.3.2 La Rivière Kwé (d'après Erbio, 2012)

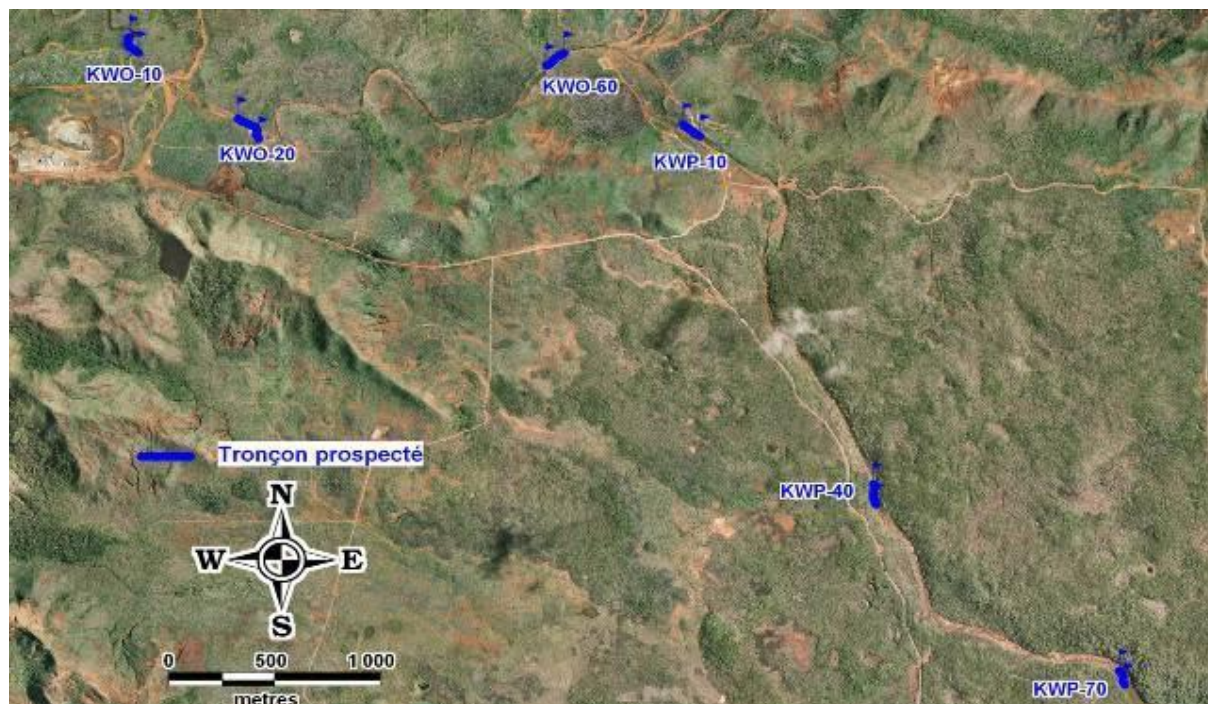
Les tronçons prospectés sur les affluents de la rivière Kwé durant les campagnes de 2012 (saison chaude et saison fraîche) sont localisés sur la Figure 55.

La diversité de la faune ichtyologique recensée dans la Kwé au cours des suivis de juin 2012 est qualifiée de 'moyenne' avec 16 espèces de poissons autochtones appartenant à 7 familles différentes, dont 3 espèces endémiques inscrites comme espèces protégées au titre du Code de l'environnement de la province Sud, mais assez bien représentées en termes d'effectif et de biomasse. En plus des espèces endémiques, 4 espèces sont présentes sur la liste rouge de l'UICN¹ en "préoccupation mineure" vis-à-vis de leur conservation.

Sur l'ensemble du cours d'eau en 2012, hormis l'espèce endémique *Sicyopus chloe* qui a uniquement été capturée dans la Kwé Ouest (KWO-60), l'ensemble des espèces inventoriées dans les divers affluents sont présentes dans la Kwé Principale.

Aucune espèce introduite ou envahissante n'a été répertoriée sur l'ensemble des stations.

¹ UICN 2011. UICN Red List of Threatened Species. Version 2011



Source : Erbio, 2012

Figure 55 : Localisation des tronçons prospectés dans la Kwé

D'après les résultats des différents descripteurs biologiques du peuplement obtenus au cours de l'étude de juin 2012 et étant donné l'effort d'échantillonnage important (6 stations), la Kwé peut être considérée comme un milieu ayant une faune ichthyologique pauvre en termes de biodiversité, d'effectif et de biomasse. La Kwé Ouest présente des valeurs très faibles pour les descripteurs biologiques du peuplement, et variables sur les trois stations étudiées. Ce constat laisse supposer que cette branche de la Kwé est davantage impactée par l'activité minière que la branche principale.

On note tout de même la présence du mulot *Cestraeus plicatilis*, espèce d'intérêt halieutique, de plus en plus rare en Nouvelle-Calédonie.

Pour les crustacés, 6 espèces de crevettes appartenant à 2 familles différentes et 1 espèce de crabe d'eau douce ont été recensées dans la Kwé.

▪ Richesse biologique comparée des affluents de la Kwé

Dans le cadre du suivi réglementaire, 15 campagnes ont déjà été réalisées dans la Kwé, mais en termes de stations étudiées et de surface échantillonnée, seules les données d'inventaire des 6 dernières campagnes sur la Kwé Ouest et la Kwé Principale sont concrètement comparables. Les résultats des inventaires poissons dans la Kwé Ouest et dans la Kwé Principale sont présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

D'une manière générale, la rivière Kwé Principale est plus riche et plus diversifiée que la Kwé Ouest. De plus, et comme cela a été observé pour l'ensemble des cours d'eau inventoriés lors de cette campagne, le tronçon aval de la Kwé Principale (station KWP-70) rassemble un plus grand nombre d'espèces et d'individus capturés par rapport aux stations amont.

Tableau 27 : Résultats du suivi de la faune ichthyologique et carcinologique de la rivière Kwé en juin 2012

Effectif	Rivière	Kwé						Totaux par espèce	Abondance (%) par espèce	Nbre/ha/espèce	Totaux par famille	Abondance (%) par famille
	Date	31/05/2012	01/06/2012	24/05/2012	24/05/2012	14/06/2012	14/06/2012					
Famille	Espèce	KWP-70	KWP-40	KWP-10	KW0-60	KWO-20	KWO-10					
ANGUILLIDAE	<i>Anguilla reinhardtii</i>		1	1				2	2,02	1,5	3	3,03
	<i>Anguilla sp. (civelle)</i>	1						1	1,01	0,8		
ELEOTRIDAE	<i>Eleotris acanthopoma</i>	4						4	4,04	3,1	39	39,39
	<i>Eleotris fusca</i>	23	1	1				25	25,25	19,2		
	<i>Eleotris melanosoma</i>	5						5	5,05	3,8		
	<i>Ophieleotris aporos</i>	2						2	2,02	1,5		
	<i>Ophieleotris nov. sp. !</i>	3						3	3,03	2,3		
GOBIIDAE	<i>Awaous guamensis</i>	1	4	1		1	1	8	8,08	6,1	12	12,12
	<i>Glossogobius celebius</i>	3						3	3,03	2,3		
	<i>Sicyopus chloe !</i>				1			1	1,01	0,8		
KUHLIIDAE	<i>Kuhlia marginata</i>		1					1	1,01	0,8	22	22,22
	<i>Kuhlia munda</i>	5	3					8	8,08	6,1		
	<i>Kuhlia rupestris</i>	3	1			4	5	13	13,13	10,0		
LUTJANIDAE	<i>Lutjanus argentimaculatus</i>	1						1	1,01	0,8	1	1,01
MUGILIDAE	<i>Cestraeus oxyrhynchus</i>	4	3	3				10	10,10	7,7	21	21,21
	<i>Cestraeus plicatilis</i>	4	3		3	1		11	11,11	8,4		
RHYACICHTHYIDAE	<i>Protogobius attiti !</i>			1				1	1,01	0,8	1	1,01
Station	Effectif	59	17	7	4	6	6					
	%	59,60	17,17	7,07	4,04	6,06	6,06					
	Surface échantillonnée (m²)	3037,5	2190,2	1986	1900	2082,9	1855,6					
	Nbre Poissons/m²	0,019	0,008	0,004	0,002	0,003	0,003					
	Nbre Poissons/ha	194	78	35	21	29	32					
	Nbre d'espèce	12	8	5	2	3	2					
	Nombre d'espèces endémiques	1	0	1	1	0	0					
Rivière	Abondance spécifique (%)	75,00	50,00	31,25	12,50	18,75	12,50					
	Effectif	99										
	%	100,00										
	Surface échantillonnée (m²)	13052										
	Nbre Poissons/m²	0,008										
	Nbre Poissons/ha	76										
	Nbre d'espèces endémiques	3										

EFFECTIF	Rivière	Kwé						Totaux par espèce	Abondance (%) par espèce	Nbre / ha / espèce	Totaux par famille	Abondance (%) par famille
	Date	31/05/2012	01/06/2012	24/05/2012	24/05/2012	14/06/2012	14/06/2012					
Famille	Espèce	KWP-70	KWP-40	KWP-10	KW0-60	KWO-20	KWO-10					
Atyidae	<i>Paratya bouvieri</i> !				16	6	24	46	6,30	35	90	12,33
	<i>Paratya intermedia</i> !					6	28	34	4,66	26		
	<i>Paratya typal</i>			1			9	10	1,37	8		
Hymenosomatidae	<i>Odiomaris pilosus</i> !	4						4	0,55	3	4	0,55
Palaemonidae	<i>Macrobrachium aemulum</i>	100	200	92	78	102	59	631	86,44	483	636	87,12
	<i>Macrobrachium caledonicum</i>	3						3	0,41	2		
	<i>Macrobrachium lar</i>	2						2	0,27	2		
Station	Effectif	109	200	93	94	114	120					
	%	14,93	27,40	12,74	12,88	15,62	16,44					
	Surface échantillonnée (m²)	3038	2190	1986	1900	2083	1856					
	Nbre macroinvertébrés/m²	0,04	0,09	0,05	0,05	0,05	0,06					
	Nbre macroinvertébrés/ha	359	913	468	495	547	647					
	Nbre d'espèce	4	1	2	2	3	4					
	Abondance spécifique (%)	57,14	14,29	28,57	28,57	42,86	57,14					
Rivière	Effectif	730										
	%	100,00										
	Surface échantillonnée (m²)	13052										
	Nbre macro-invertébrés/m²	0,06										
	Nbre macro-invertébrés/ha	559										
	Nbre d'espèce	7										

Source : Erbio, 2012

D'après le Tableau 27, cette tendance a été observée durant chaque campagne depuis 2000. La faune d'eau douce augmente en densité et en biomasse à mesure que l'on se dirige vers l'embouchure.

Malgré des différences de plans d'échantillonnage, les résultats des inventaires réalisés dans la Kwé Nord et la Kwé Est montrent que ces branches sont bien moins riches et/ou en moins bon état de santé que les deux branches Ouest et Principale. Toutefois, l'effort d'échantillonnage opéré dans ces deux branches de la Kwé restant faible, il n'est, à ce stade, pas possible de considérer que l'état de la Kwé Nord et de la Kwé Est serait nécessairement dû à l'exploitation du projet minier et des activités du secteur.

▪ Evolution des résultats jusqu'à 2012

En termes de diversité, 8 familles, regroupant 26 espèces ont été recensées dans la Kwé depuis 1995. Tous suivis confondus depuis 2000, 24 espèces ont été observées dans la Kwé Principale et la Kwé Ouest. Depuis 2010 et jusqu'à l'étude de juin 2012, 11 nouvelles espèces, dont 4 endémiques, avaient été recensées dans ces deux branches de la Kwé. La famille des Ophichthyidae n'a pas été retrouvée lors de l'étude de 2012.

Sur l'ensemble des espèces recensées depuis le début du suivi (26 espèces), 10 espèces n'ont pas été retrouvées au cours de l'étude 2012. Néanmoins cette absence n'est pas forcément un signe de dégradation ou d'absence définitive du cours d'eau. Les effectifs et la richesse spécifique de la faune ichthyologique des stations inventoriées sur la Kwé Ouest et la Kwé Principale depuis 2000 sont présentés dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Effectifs et richesse spécifique de la faune ichthyologique des stations inventoriées de la Kwé Ouest et la Kwé Principale depuis 2000

		KWP-70								KWP-40				KWP-10								KW0-60				KWO-20								KWO-10				Total
	Année	mai 2000	juin 2007	juin 2009	juin 2010	janvier 2011	juin 2011	janvier 2012	juin 2012	janvier 2011	juin 2011	janvier 2012	juin 2012	juin 2007	juin 2009	juin 2010	janvier 2011	juin 2011	janvier 2012	juin 2012	janvier 2011	juin 2011	janvier 2012	juin 2012	mai 2000	septe mbre 2007	juin 2009	juin 2010	janvier 2011	juin 2011	janvier 2012	juin 2012	janvier 2011	juin 2011	janvier 2012	juin 2012	nbre abs	
Famille	Espèce	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs	nbre abs		
ANGUILLIDAE	Indéterminé				3				1																											4		
	Anguilla marmorata		1					2																		1						1	1			6		
	Anguilla reinhardtii				1		1					1				1								1												9		
ELEOTRIDAE	Eleotris sp.			1		4																															5	
	Eleotris acanthopoma								4																												4	
	Eleotris fusca		2	9	12	14	40	13	23	1	3		1						2	1	1															122		
	Eleotris melanosoma	1		4		2	7		5																											19		
	Ophieleotris aporos								2																												2	
	Ophieleotris nov. sp. !								3																												3	
	Awaous guamensis	2	2		1	4	2		1	1	6		4					1	1	1	1	2	2				1	2	4	3	7	1	1	3	2		1	56
GOBIIDAE	Awaous ocellaris										1																										1	
	Glossogobius celebius				3	3	5	2	3																											16		
	Istigobius decoratus							1																													1	
	Redigobius bikolanus			2		3	3	1																												9		
	Schismatogobius fuligineus !							1																													1	
	Sicyopterus lagocephalus				4	2	1			1	2								1																	11		
	Sicyopterus sp.					6	3																													9		
	Stenogobius yateiensis !				1																																1	
	Sicyopus chloe !																								1												6	
	Kuhlia marginata						1					1																									2	
KUHLIIDAE	Kuhlia munda		3	3	7	10	9	7	5				3																							47		
	Kuhlia rupestris	4	7	7	12	4	13	13	3		4		1		1	1	2	1			5	2			1	4	11	5	4	7	1	4	12	23	5	5	162	
	Lutjanus argentimaculatus			1		2	2		1																											6		
MUGILIDAE	Indéterminé																								1											1		
	Cestraeus oxyrhynchus				1		4	2	4		3		3					1		3			2	2											25			
	Cestraeus plicatilis	4	1		5	1	9	1	4	4	4		3			3		4	4		4	6	2	3			1				1		2		66			
OPHICHTHYIDAE	Lamnostoma kampeni					1	1																													2		
RHYACICHTHYIDAE	Protogobius attiti !										4			1		1				1															7			
Nombre d'espèces de poissons		3	6	6	10	10	14	10	12	4	9	0	8	1	1	4	2	5	3	5	4	4	3	2	1	4	3	2	3	2	3	3	4	5	1	2	24	
Effectif total de poissons		11	16	27	50	56	101	43	59	7	28	0	17	1	1	6	3	8	7	7	12	12	5	4	1	7	14	9	8	14	3	6	17	32	5	6	603	

Source : Erbio, 2012

▪ Inventaires complémentaires sur les secteurs KO4 et KO5

Les secteurs KO4 et KO5 sont les prochains secteurs de développement de VNC dans le bassin versant de la Kwé. A ce titre, ils ont bénéficié d'inventaires spécifiques. La localisation des stations du réseau de suivi de l'ichtyofaune et de la faune carcinologique des bassins est indiquée dans le tableau ci-dessous. Les inventaires réalisés en 2011 sont apparentés à des inventaires d'état actuel avant aménagement sur ces secteurs.

Tableau 29 : Positionnement des stations d'inventaire ichtyofaune et de la faune carcinologique sur KO4 et KO5

Bassin versant	Nom de la station	Début du tronçon		Fin du tronçon	
		RGN 91 Est	RGN 91 Nord	RGN 91 Est	RGN 91 Nord
KO4	KO4-10-P	697869	7533154	697799	7533235
	KO4-20-P	698232	7532716	698189	7532800
	KO4-50-P	698579	7532419	698482	7532431
KO5	KO5-10-P	699672,412	7534248,940	699616,411	7534308,940
	KO5-20-P	699764,425	7530624,922	699823,415	7533664,938
	KO5-50-P	699865,418	7532833,934	699866,418	7532848,934

Source : Erbio, juillet et août 2011

Sur KO4 comme sur KO5, les résultats montrent des effectifs de poissons et une diversité spécifique très faibles :

- sur KO4, 13 individus appartenant à 5 espèces de poissons (aucune endémique) ont été inventoriés ;
- sur KO5, seulement 5 poissons ont été inventoriés, ils appartenaient à 3 espèces autochtones qui n'apparaissent sur aucune des listes de protection des espèces en Nouvelle-Calédonie (ni sur la liste fixée par le Code de l'environnement de la province Sud et ni sur la liste rouge de l'UICN).

Ces parties amont du bassin versant de la Kwé ne semblent donc pas être favorables à la présence des communautés piscicoles. Les faibles effectifs et la faible diversité peuvent s'expliquer par le fait que les stations se situent probablement trop en amont (de l'embouchure) et/ou qu'il y a des obstacles au franchissement pour ces espèces. En effet, la majorité des espèces de poissons en Nouvelle-Calédonie, dont celles capturées ici, sont migratrices (amphidromes). Au niveau de la faune carcinologique on trouve :

- 3 espèces (227 individus), dont 2 endémiques à la Nouvelle-Calédonie ont été inventoriés dans KO4 ;
- 4 espèces de crevettes (921 individus) dont 3 endémiques ont été inventoriées sur KO5, avec des densités élevées (12 971 ind./ha pour l'ensemble du bassin KO5). 95 % des individus capturés font partie du genre *Paratya*, endémique à la Nouvelle-Calédonie et dont l'aire de répartition est surtout concentrée sur le Grand Sud. En particulier, l'espèce *P. Paratya typa* ne semble pas présente en province Nord. Il convient donc de suivre et de préserver ces espèces d'éventuels impacts environnementaux (Erbio, 2011).

5.2.8.3.3 Suivi des macro-invertébrés

▪ Méthode des indices biotiques

Le suivi biologique des rivières de la région du site de Goro est réalisé selon la méthode des indices biotiques développée spécifiquement pour la Nouvelle-Calédonie (IBNC) par N. MARY (1999 - IBNC – Indice biotique utilisé en Nouvelle-Calédonie). L'IBNC permet de mettre en évidence une perturbation de la qualité des eaux par des pollutions organiques (rejets domestiques, élevage, etc.). On calcule cet indice avec des données récoltées dans les rivières. A plusieurs endroits, on prélève, à l'aide d'un filet à maille fine, des organismes qui vivent dans l'eau de la rivière. Il s'agit de vers, de mollusques, de crustacés et de larves d'insectes. Ces différents organismes sont plus ou moins sensibles à la pollution. Pour certains d'entre eux, on a évalué cette sensibilité par espèce ou groupe d'espèces sur une échelle de 1 à 10 (1 : pas sensible ; 10 : très sensible). Cette sensibilité est qualifiée de *score*.

Dans les prélèvements effectués dans la rivière, on détermine les organismes présents. On ne tient pas compte du nombre d'individus trouvés, mais seulement du nombre d'espèces ou groupes d'espèces trouvés. Avec ceux qui disposent d'un score, on calcule une moyenne des scores. L'indice IBNC est basé sur une liste de 66 taxa intégrateurs de la pollution. Il est établi selon la formule :

$$IBNC = 1/n \sum_{i=1}^n si$$

Avec n = nombre de taxa intégrateurs

Si = score du taxon i relativement à la pollution.

En fonction de la valeur de l'indice, on attribue une classe de qualité écologique au cours d'eau. Les valeurs seuils communément utilisées sont les suivantes :

Excellente qualité	IBNC > 6.5
Bonne qualité	5.50 < IBNC ≤ 6.50
Qualité moyenne	4.50 < IBNC ≤ 5.50
Mauvaise qualité	3.50 < IBNC ≤ 4.50
Très mauvaise qualité	IBNC ≤ 3.50

IBS – Qualité Bio-sédimentaire. L'Indice Biotique Sédimentaire (IBS) permet de mettre en évidence une perturbation de la qualité des eaux par des pollutions par les particules fines. Il est calculé d'une façon similaire et le score final est l'IBS. Cet indice est utilisé notamment pour les cours d'eau drainant les massifs miniers, à dominante ultrabasique, ou immédiatement en aval de ces derniers. Les valeurs seuils communément utilisées sont les suivantes :

Excellente qualité	IBS > 6.5
Bonne qualité	5.75 < IBS ≤ 6.50
Qualité moyenne	5.00 < IBS ≤ 5.75
Mauvaise qualité	4.25 < IBS ≤ 5.00
Très mauvaise qualité	IBS ≤ 4.25

▪ Suivi des macro-invertébrés de la Kwé

Parmi les 5 stations de suivi de l'IBNC installées dans le périmètre de la zone d'étude, celles concernant l'activité minière sont positionnées sur la Kwé Ouest (KO), la Kwé Nord (KN), la Kwé Principale (KP) et la rivière Trou Bleu (TB).

Tableau 30 : Localisation et description des points de suivi pour l'IBNC

Nom	Bassin versant	Type de suivi	Fréquence*	Raison d'être	RGN 91 Est	RGN 91 Nord
4-M	KN	IBNC	Annuelle	Arrêté n° 1467-2008/PS	498889,4	211632,5
4-N	KO	IBNC	Annuelle	Arrêté n° 1467-2008/PS	497415,6	210891,5
1-E	KP	IBNC	Semestrielle	Arrêté n° 1467-2008/PS	500042,1	208314,8
3-B	KO	IBNC	Semestrielle	Arrêté n° 1467-2008/PS	496478,1	210820,1
3-C	TB	IBNC	Trimestrielle	Mesure compensatoire	499124	206972

Les Tableaux 31, 32 et 33, présentent les résultats obtenus pour les indices IBNC et IBS lors des campagnes d'échantillonnage les plus récentes de 2010 à 2012.

Tableau 31 : Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2010

Nom	Bassin versant	Type de suivi	Richesse spécifique (taxa)	Note IBNC – Qualité	Note IBS - Qualité	Date
4-M	KN	IBNC	7	Ne peut être considéré (nb de taxa < à 7)	Ne peut être considéré (nb de taxa < à 7)	Juin 2010
4-N	KO	IBNC	5	Ne peut être considéré (nb de taxa < à 7)	Ne peut être considéré (nb de taxa < à 7)	Juin 2010
1-E	KP	IBNC	18	5,43 - Passable	4,85 - Mauvaise	Déc 2010
3-B	KO	IBNC	21	5,44 - Passable	5 - Passable	Déc 2010
3-C	TB	IBNC	< à 20	5,53 - Bonne	< à 5 - Mauvaise	Déc 2010

Tableau 32 : Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2011

Station	Date de prélèvement	Nombre d'individus	Densité (nb d'indiv/ m2)	nb total de taxons	Echantillonneur	IBNC	IBS	Qualité biologique (IBNC)	Qualité biosédimentaire (IBS)
1-E	27/07/11	25	100	8	Aqua Terra	6,2	4,67	Bonne	Mauvaise
1-E	22/11/11	198	792	11	Aqua Terra	5	3,86	Passable	Très mauvaise
3-B	27/07/11	79	316	11	Aqua Terra	7,63	6,44	Excellente	Bonne
3-B	22/11/11	88	352	12	Aqua Terra	6,44	5,89	Bonne	Bonne
3-C	24/03/11	258	1032	18	Biotop	4,69	4,85	Passable	Mauvaise
3-C	27/07/11	9	36	5	Aqua Terra	5,6	6	Bonne	Bonne
3-C	23/09/11	49	196	8	Aqua Terra	5,83	6,14	Bonne	Bonne
3-C	22/11/11	59	236	5,75	Aqua Terra	5,2	5	Passable	Mauvaise
4-M	28/07/11	30	120	30	Aqua Terra	7	6,25	Excellente	Bonne
4-N	28/07/11	8	32	5	Aqua Terra	4,75	4,5	Passable	Mauvaise
5-E	26/07/11	28	112	6	Aqua Terra	5,67	5,4	Bonne	Passable
KE-05	28/07/11	19	76	9	Aqua Terra	5,2	5	Passable	Mauvaise

Tableau 33 : Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2012

Station	Date de prélèvement	Nombre individus	Densité (nb d'indiv/m2)	nb total de taxons	Echantillonneur	IBNC	IBS	Qualité biologique (IBNC)	Qualité biosédimentaire (IBS)
3-C	10/05/2012	64	256	8	Aqua Terra	6,14	5,29	Bonne	Passable
4-M	19/06/2012	22	88	3	Aqua Terra	4,33*	4,67*	Mauvaise	Mauvaise
4-N	19/06/2012	42	168	8	Aqua Terra	4,4*	3,8*	Mauvaise	Très mauvaise
3-B	19/06/2012	64	256	10	Aqua Terra	5,63	5,33	Bonne	Passable
1-E	20/06/2012	11	44	3	Aqua Terra	6,5*	5,5*	Bonne	Passable
3-C	20/06/2012	15	60	6	Aqua Terra	5,67*	4,67*	Bonne	Mauvaise
KE-05	18/06/2012	5	20	2	Aqua Terra	4*	5,5*	Mauvaise	Passable

* Le nombre de taxa indicateur n'est pas suffisant pour que l'indice soit valide et représentatif.

Le suivi des années 2010 à 2012 permet de dégager les tendances actuelles par affluent de la Kwé et pour la rivière périphérique Trou Bleu :

1. **Kwé Ouest** : on observe une dégradation à la fois de la qualité organique et de la qualité sédimentaire de cet affluent de l'amont (station 3-B), où la qualité est globalement bonne, vers l'aval (station 1-E) qui présente des qualités bonnes à très mauvaises pour les deux indices, sauf en 2012 où la qualité des cours d'eau est identique, mais le nombre de taxa ne permet pas de valider la note indicienne.
2. **Kwé Nord** : les eaux de surface de cet affluent, plutôt bonnes (pour IBNC et IBS) précédemment, se dégradent nettement en 2012 (station 4-M), mais le nombre de taxa ne permet pas de valider la note indicienne.
3. **Kwé principale** : la qualité organique est plutôt bonne sur les 3 années alors que ce cours d'eau présente une pollution sédimentaire régulière (IBS mauvais – station 1-E), mais le nombre de taxa ne permet pas de valider la note indicienne en 2012.
4. **Trou Bleu** : pour le Trou Bleu (station 3-C), la qualité biologique est généralement bonne alors que les résultats de l'IBS montrent régulièrement une pollution sédimentaire. Pourtant, aucune activité minière n'est exercée sur ce cours d'eau et aucun signe de pollution

organique n'est observable. L'indice IBS indique une pollution de type sédimentaire, probablement liée aux pluviométries des mois précédents l'échantillonnage.

▪ Etat des lieux sur les stations KO4 et KO5 en 2011

Deux états des lieux ont été dressés en avril 2011 sur les bassins versants KO4 et KO5 (SMLT), spécifiquement en vue de l'aménagement de ces deux secteurs. Les résultats sur 8 stations d'échantillonnage sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 34 : Résultats des indices IBNC et IBS, campagnes de 2011

Station	Date de prélèvement	Nombre individus	nb total de taxons	Echantillonneur	IBNC	IBS	Qualité biologique (IBNC)	Qualité biosédimentaire (IBS)
KO4-05-I	02/05/2011	118	19	ERBIO	6.21	5.15	Bonne	Passable
KO4-10-I	27/04/2011	800	23	ERBIO	5.71	4.94	Bonne	Mauvaise
KO4-20-I	27/04/2011	676	21	ERBIO	5.57	5.13	Bonne	Passable
KO4-50-I	02/05/2011	69	17	ERBIO	5.92	4.92	Bonne	Mauvaise
KO4-DOL01-I	02/05/2011	188	18	ERBIO	-	-	-	-
KO5-10-I	02/05/2011	316	24	ERBIO	5.78	5.35	Bonne	Passable
KO5-20-I	02/05/2011	185	19	ERBIO	5.57	5.15	Bonne	Passable
KO5-50-I	02/05/2011	281	21	ERBIO	5.94	5.43	Bonne	Passable

Sur KO5, 34 taxa d'invertébrés macrobenthiques ont été répertoriés. Sur KO4, 40 espèces sont recensées dont 11 taxa endémiques. L'IBNC indique une qualité d'eau bonne sur KO4 comme sur KO5, les milieux sont donc préservés des pollutions organiques.

L'IBS indique une qualité d'eau mauvaise à passable sur KO4 et passable sur KO5, ce qui indique une pollution sédimentaire, probablement générée par les zones érodées situées en amont des deux secteurs.

5.2.9 Qualité des sédiments

La qualité des sédiments des rivières de la région du projet VNC a été évaluée en 1994 et en 2000. La qualité des sédiments a été analysée pour les rivières Kwé Principale, Kwé Ouest, Kwé Est, Kuébini et Wajana.

5.2.9.1 Valeurs guides

A titre indicatif, les résultats d'analyses ont été comparés à ceux de la rivière de référence (rivière Carénage) et à des valeurs guides françaises calculées pour les sols, présentées par le ministère de l'Ecologie et du développement durable dans son *Guide méthodologique pour la gestion des sites (potentiellement) pollués - Version 2*, publié par le BRGM en mars 2000. Ce guide n'est plus véritablement utilisé en métropole depuis la mise en place d'une nouvelle méthodologie en 2007 mais il était une référence au moment des analyses : les valeurs guides étaient alors utilisées à l'occasion des évaluations simplifiées des risques (ESR) et permettaient de caractériser la contamination des sols et des nappes souterraines. Le guide définit plusieurs valeurs guides :

- les valeurs de définition de source dans les sols (VDSS) sont utilisées pour évaluer la pollution dans un sol. Ces valeurs permettent de déterminer si un sol contenant une substance chimique donnée constitue une source de pollution ;

- les valeurs de constat d'impact (VCI) permettent de constater l'importance de l'impact sur les milieux sols ou eaux.

5.2.9.2 Qualité des sédiments jusqu'en 2005

Les sédiments des rivières de la région de Goro sont généralement pauvres en carbone organique, en phosphore et en azote total. Le Tableau 35 résume les résultats obtenus sur les échantillons prélevés dans les rivières de la région de Goro.

Tableau 35 : Qualité des sédiments

Paramètre	Concentration moyenne (mg/kg)	Intervalles de confiance de 95 % (mg/kg)
Nickel	4 715	3 631 - 5 799
Chrome	11 149	1 450 - 11 848
Cuivre	35	30 - 41

Source : Rescan, 2000

De même que pour les eaux de surface, ces résultats montrent de fortes concentrations naturelles en métaux reflétant le bruit de fond géochimique des sols dans la zone du projet VNC. Certains métaux, notamment le nickel, le chrome et le cuivre, sont naturellement présents dans les sédiments des rivières à des niveaux pouvant être toxiques pour les organismes aquatiques non adaptés à ce milieu :

- nickel : la concentration est comprise entre 1 460 et 7 450 mg/kg, ce qui est en moyenne très largement supérieur à la VDSS et la VCI usage non sensible (900 mg/kg) ;
- chrome : la concentration naturelle est comprise entre 3 440 et 15 400 mg/kg. Elle est très supérieure en moyenne à la VDSS (65 mg/kg) et par endroit à la VCI usage non sensible (7 000 mg/kg) ;
- cobalt : la concentration naturelle en cobalt est comprise entre 136 et 1 050 mg/kg. Elle est supérieure à la VDSS (120 mg/kg) et par endroits à la VCI usage sensible (240 mg/kg).

La diversité et l'endémisme de la faune d'eau douce montrent que les écosystèmes d'eau douce se sont adaptés à ces concentrations élevées en métaux (bruit de fond naturel). Leur abondance semble plutôt limitée à cause de la faible réserve en nutriments des sédiments et de l'eau et donc de la faible biomasse des producteurs primaires. Le Tableau 36 présente la synthèse des mesures.

Tableau 36 : Etat initial de la qualité des sédiments de rivière dans la région de Goro (2000)

Paramètres	Unités	Kué Principale				Kué Ouest		Kué Est	Kué Bini				Wadjana				Synthèse des données		Carénage		Valeurs guides françaises sol		
		Centre		Aval		FW4	2000	1994	Amont		Aval		Amont		Aval				Amont		VDSS	VClus	VClusn
		FW3	2000	FW17	2000				FW12	2000	FW1	2000	FW13	2000	FW6	2000							
		min	max	min	max	min	max		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max			
Phosphore	mg/kg	<0,2	0,5	<0,2	0,2	<0,2	<0,2	na	<0,2	<0,2	<0,2	1,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	1,2	<0,2	<0,2			
Azote Total	%	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	na	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03	0,13			
Potassium	mg/kg	<620	<800	<620	<630	<630	<630	<20	<400	<800	<800	<800	<800	<800	<800	<800	<400	<800	<1000	<2000			
Soufre Total	%	0,07	0,09	0,07	0,08	0,08	0,11	na	0,07	0,09	0,05	0,09	0,06	0,07	0,1	0,12	0,05	0,12	0,07	0,14			
Calcium	mg/kg	35	57	33	43	<30	<30	na	<30	21	46	76	39	47	34	35	21	76	66	191			
Magnésium	mg/kg	450	1 190	450	488	1 190	2 210	835	115	144	3 930	17 700	1 560	2 190	382	482	115	17 700	980	6 630			
Sodium	mg/kg	<300	<400	<330	<330	<330	<330	<20	<200	<400	<300	<400	<300	<400	<300	<400	<200	<400	<500	<700			
Sulfate	mg/kg	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na			
Carbone organique total	%	0,33	0,57	0,26	0,31	0,31	0,42	na	0,76	1,15	0,31	0,53	0,49	0,64	0,31	0,52	0,26	1,15	0,55	2,05			
Aluminium	mg/kg	15 430	24 500	14 930	15 930	17 020	20 230	7 150	15 100	19 500	13 500	18 000	18 000	22 100	15 800	18 200	7 160	24 500	35 200	51 300			
Antimoine	mg/kg	0,1	0,16	0,09	0,15	0,13	0,27	na	0,13	0,31	0,12	0,15	0,06	0,13	0,11	0,17	0,06	0,31	0,1	0,3	50	100	250
Argent	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	na	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Arsenic	mg/kg	3,1	3,8	2,5	3,3	1,33	1,66	5	1,47	5,4	2,9	5,2	1,17	5,2	5,2	7,7	1,17	7,7	4,13	10,1	19	37	120
Cadmium	mg/kg	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,4	<0,4	10	20	60
Chrome	mg/kg	10 300	13 200	10 700	11 200	8 740	9 490	9 440	8 790	13 200	8 500	11 500	8 370	12 300	12 200	15 400	3 440	15 400	11 900	14 700	65	130	7 000
Cobalt	mg/kg	145	508	136	697	597	1 050	151	255	421	325	710	680	824	147	235	136	1 050	1 070	1 510	120	240	1 200
Cuivre	mg/kg	21	39	21	24	34	42	13	16	21	28	44	46	57	31	34	13	57	49	62	95	190	950
Fer	mg/kg	320 030	448 000	307 030	345 000	313 000	340 000	151 000	270 000	394 000	315 000	431 000	417 000	512 000	389 000	509 000	151 000	512 000	511 000	584 000			
Plomb	mg/kg	1	1	<1	1	1	2	15	2	4	1	2	1	2	<1	1	<1	15	2	4	200	400	2000
Manganèse	mg/kg	1 630	3 570	1 450	7 350	4 210	6 160	906	1 370	3 390	2 840	9 000	4 700	5 840	1 430	1 820	906	9 000	6 670	6 980			
Mercuré	mg/kg	0,056	0,078	0,052	0,091	0,047	0,055	<0,2	0,078	0,161	0,065	0,255	0,118	0,135	0,058	0,091	0,047	0,255	0,073	0,116	3,5	7	690
Nickel	mg/kg	1 720	5 020	1 830	2 040	4 040	5 230	1 840	1 460	2 080	3 880	6 330	6 540	7 450	2 100	2 710	1 460	7 450	6 470	11 800	70	140	930
Selenium	mg/kg	0,5	1,3	0,3	0,6	0,2	0,3	na	0,1	0,7	0,6	1,3	0,2	1,5	0,6	1,7	0,1	1,7	2,4	4,5			
Zinc	mg/kg	84	193	85	97	159	189	55	90	136	141	226	268	322	120	141	55	322	280	365	4 500	9 000	

Note : Les résultats d'analyses indiqués pour l'année 2000 proviennent de l'étude RESCAN 2000.

De manière générale 2 à 3 échantillons ont été prélevés par station en mai 2000 afin de garantir une bonne représentativité de l'échantillonnage.

Pour la Kué Est les résultats indiqués proviennent d'un échantillon prélevé par SNC-Lavalin en octobre 1994.

La rivière Carénage est utilisée comme rivière de référence car elle est suffisamment éloignée de la zone du projet

5.2.9.3 Tendance actuelle (suivi règlementaire)

Le suivi des sédiments concerne la nature et de la qualité des sédiments et s'effectue sur six stations dans le bassin de la Kwé.

Pour l'année 2011, les analyses effectuées sur la nature des sédiments pour les stations de la rivière Kwé Ouest montrent une dominance de sédiments grossiers (graviers et sable grossier). La part des éléments fins reste minoritaire. Cette tendance est confirmée par les prélèvements réalisés en 2012, dans lesquels près de 90 % des sédiments sont des sables grossiers.

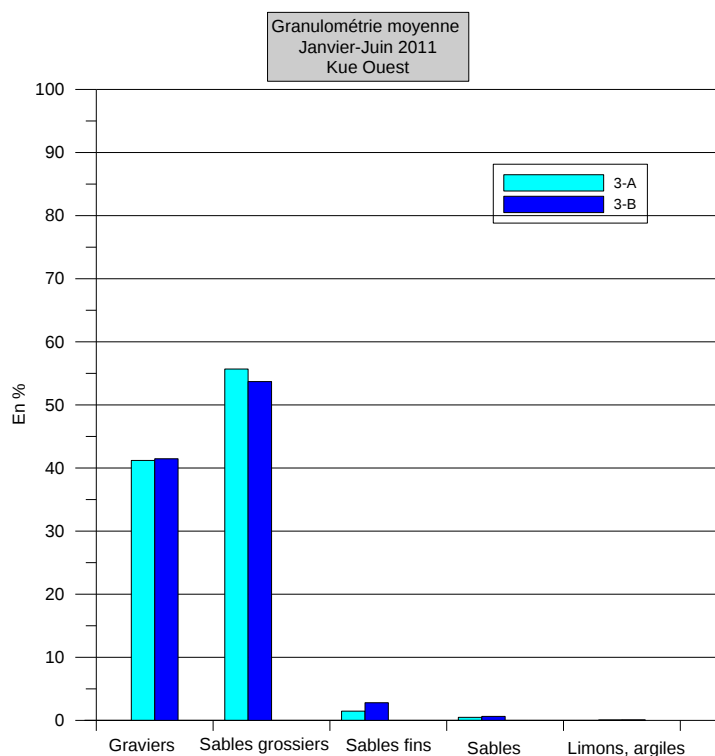


Figure 56 : Résultats des analyses granulométriques en 2011 aux stations 3-A et 3-B (Kwé Ouest, juillet 2011)

L'analyse de la composition minérale des sédiments révèle une grande quantité de métaux. En effet, dans ces sédiments, la présence de cobalt, chrome, manganèse, nickel et zinc est régulièrement détectée. Cette composition est évocatrice du bruit de fond des sols latéritiques de la Nouvelle-Calédonie. Ces résultats sont donc corrélés à l'origine des sédiments car ce sont principalement des sédiments terrigènes qui ont été retrouvés dans ce cours d'eau.

5.2.10 Qualité biologique des eaux de dolines et plans d'eau

5.2.10.1 Etat initial

L'étude de caractérisation menée par Rescan en 2000 indique que les lacs échantillonnés présentent généralement un habitat propice pour les poissons avec une couverture adéquate composée de végétaux, de rochers et de débris végétaux. Très peu de poissons ont été observés en 2000. Seuls 2 poissons, probablement des anguilles, ont été observés dans un seul lac.

Au cours de l'inventaire faunistique de la doline de l'usine pilote VNC de 1999, Erbio a observé un petit poisson à 2 reprises, qui était probablement l'espèce introduite *Oreochromis mossambicus* ou un goby (*Awaous guamensis*), espèce autochtone commune.

Tableau 37 : Synthèse des travaux réalisés sur les lacs et les dolines de la région de Goro

Date	Expertise	Lieu	Richesse spécifique observée
1995	SNC-Lavalin	Lac en Huit, Grand Lac	Aucun invertébré benthique Traces de reptation et de déjections observées sur le fond indiquant la présence d'espèces vivantes, amphipodes
1999-2004	Erbio	2 plans d'eau permanents	17 espèces dont 1 coléoptère endémique <i>Megaporus</i>
		2 dolines périodiques	Conchostracé <i>Lynceus</i>
2000	Rescan	6 lacs	Large degré de variabilité entre les sites échantillonnés Présence de communautés benthiques en bonne santé dans 3 des 6 lacs inventoriés offrant un substrat adéquat Abondance d'oligochètes et de diptères

Tableau 38 : Macro-invertébrés recensés dans la doline de l'usine pilote et dans deux dolines de référence

Taxon	Espèce	Statut	DINCO1	DINCO2
Mollusques	<i>Physastra nasuta</i>	Endémique	X	X
Arachnides	<i>Araneae non déterminé</i>	Autochtone		X
Hétéroptères	<i>Anisops cleopatra</i>	Autochtone	X	X
	<i>Anisops hyperion</i>	Autochtone	X	X
	<i>Limnogonus fossarum</i>	Autochtone		X
	<i>Limnogonus sp.</i>	Autochtone	X	
Odonates	<i>Aechna brevistyla</i>	Autochtone	X	X
	<i>Tramea transmarina intersecta</i>	Autochtone	X	X
	<i>Hemicordulia sp.</i>	?		X
	<i>Lestes sp.</i>	Autochtone		X
	<i>Zygoptère</i>	?	X	
Coléoptères	<i>Gyrinus convexiusculus</i>	Autochtone	X	X
	<i>Dineutus australis</i>	Autochtone	X	
Dytiscidae	<i>Hyphydrus elegans</i>	Autochtone		X
	<i>Megaporus nsp.</i>	Endémique	X	X
	<i>Onychohydrus scutellaris</i>	Autochtone		X
Conchostracae	<i>Lynceus nsp.</i>	Endémique	X	
Total	17	> ou = 13	11	13

Ces milieux sont souvent colonisés par l'espèce de grenouille introduite *Litorina aurea*, dont les têtards se trouvent en nombre parfois très important.

Dolines périodiques

Les dolines périodiques, en eau lors des fortes précipitations, sont caractéristiques des milieux temporaires. Leur surface peut-être bien plus étendue que celle des dolines permanentes avec une profondeur ne dépassant pas les 2,50 m en pleine eau. La végétation rivulaire est identique à celle des dolines permanentes mais les espèces arbustives tolérantes aux inondations peuvent se développer à même le lit (niaoulis essentiellement) donnant ce caractère occasionnel de forêt immergée. Le fond est bien moins vaseux (car soumis à la dessiccation) et occupé par de nombreux héliophytes.

Du fait de la faible profondeur, l'amplitude thermique est bien plus importante avec un rafraîchissement plus rapide et un réchauffement important, accéléré par la baisse de niveau, aboutissant à l'assèchement complet.

L'impossibilité pour la plupart des macro-invertébrés d'effectuer un cycle biologique complet restreint la richesse spécifique aux espèces les plus mobiles ou adaptées aux milieux temporaires. C'est le cas du Conchostracé Lynceus sp. qui se développe très rapidement, notamment dans une doline inventoriée à ce jour et supporte plusieurs années de sécheresse avant de reprendre son cycle vital. Il vit à proximité des touffes d'héliophytes immergées. Les autres taxons présents, mollusques (genre Physastra) et larves de libellules, observent la même répartition que dans les dolines permanentes.

Les grenouilles Litorina aurea sont encore souvent présentes.

5.2.10.2 Inventaire faunistique des zones humides

Un inventaire faunistique des zones humides a été mené en 2010 sur 6 plans d'eau présents dans l'emprise de la mine à 5 ans (ancien projet), le tableau suivant présente le positionnement des stations (Erbio, 2010).

Tableau 39 : Coordonnées des stations d'inventaire faunistique des zones humides

Station	X (IGN 72)	Y (IGN 72)
ZH-01	702868	7533537
ZH-02	703645	7533065
ZH-03	703515	7532763
ZH-04	703358	7532704
ZH-05	702489	7532806
ZH-06	702276	7532870

Source : Erbio, juillet 2010

Ce premier inventaire a permis de collecter sur l'ensemble des stations 2 475 individus, dont 2 134 appartiennent à 6 classes : des amphibiens (têtards), des arachnides (araignées), des clitellés (oligochètes), des nématodes (vers), des larves d'insectes divers et des ostracodes. 13,8 %, restent indéterminés.

Globalement tous les plans d'eau semblaient impactés par les activités minières (les habitats sont modifiés, envasés, l'eau plus ou moins turbide), mis à part la station ZH-03, seul plan d'eau qui affichait une eau limpide et des habitats préservés entourés de joncs et de végétation primaire.

5.2.11 Usage de la ressource

 Source : Extrait du Rapport intitulé VNC NOUVELLE CALEDONIE, 2010 Suivi environnemental – Rapport annuel 2010 – Captages. 20p.

5.2.11.1 Principaux usages

Les principaux usages des eaux superficielles recensés sont :

- l'adduction en eau potable (AEP) pour la base-vie, les tribus alentours, l'usine, l'unité de Préparation du Minerai et Prony Energies,
- l'irrigation pour la pépinière de VNC,
- l'usage industriel pour les installations de chantier (phase de construction).

A l'heure actuelle, 6 captages permettent de satisfaire ces usages. Ils sont listés et détaillés dans le Tableau 40 suivant.

Tableau 40 : Localisation et description des captages

Dénomination	Bassin Versant	Type de suivi	Statut	Autorisation	Utilisation de l'eau captée	Coordonnées RGNC 91	
						X	Y
Captage lac de barrage de Yaté	Lac de Yaté	Captage	Actif	Arrêté n° 70-2007/PS du 12 février 2007	Approvisionnement en eau des installations de VNC et de la centrale à charbon de Prony Energies. Alimentation en eau potable de la base-vie, de l'Usine, de l'Unité de Préparation du Minerai et de Prony Energies pendant la phase d'exploitation.	488618	227090
Captage du Grand lac pour la pépinière	Plaine des lacs	Captage	Actif	Arrêté n° 551-2014/ARR/DDR du 2 avril 2014	Alimentation en eau de la pépinière de VNC	493969	214324
Captage du grand lac pour le camp de la géologie	Plaine des lacs	Captage	Actif	N°710-2013/ARR/DDR du 10 juin 2013	Alimentation en eau du camp de la géologie	494066	214500
Captage dans la Kué Ouest et Kué principale	Kué Ouest et Kué principale	captage	Actif	Arrêté n° 1059-2005/PS du 25 août 2005	Alimentation en eau potable de la base-vie et en eau industrielle des installations de chantier pendant la durée de la construction. Alimentation en eau industrielle de l'Unité de Préparation de Minerai pour l'exploitation.	E 699 530 E 701 425 (UTM IGN 72)	N 7 531 810 N 7 532 080 UTM IGN 72)
Captage de la Truu	Truu	Captage	Actif	Aucune autorisation de prélèvement enregistrée	Alimentation en eau potable du village de la Truu.	ND	ND
Captage de la Kué Binyi	Kué Binyi	Captage	Actif	Demande d'autorisation de prélèvement en cours d'instruction (Mairie de Yaté)	Alimentation en eau potable des tribus depuis le Nord de Yaté jusqu'à Goro	503 478	215 747
Captage de la Wajana	Wajana	Captage	Actif	Arrêté n° 81/300/CG du 23/06/1981	Alimentation en eau potable de la tribu de Goro Alimentation électrique par hydroélectricité	503 859	212 158
Captage de la Kué Nord	Kué Nord	capatage	Actif	Arrêté n°1339-2011/ARR/DENV du 3 mai 2011	Alimentation en eaux brutes des installations (arrosages)	498 856	211 150

L'usage de la ressource en eau est réglementé par des arrêtés imposant une limite de captage ou de pompage.

5.2.11.2 Périmètres de protection des eaux (PPE)

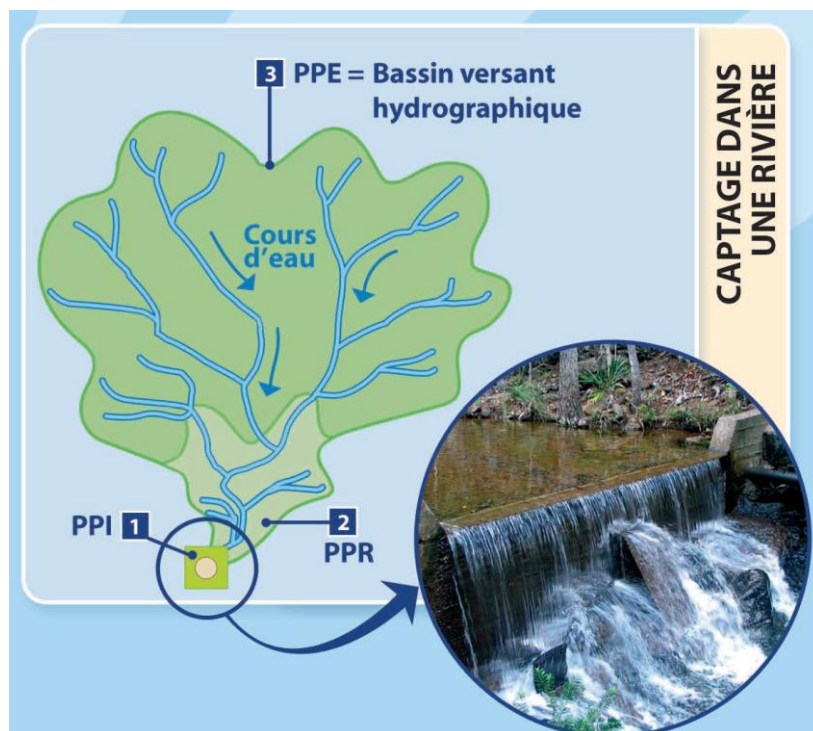
 Pièces graphiques – Carte D13 – Localisation des périmètres de protection des eaux

Les périmètres de protection des eaux correspondent à un zonage établi autour des points de captage d'eau potable. Ils constituent le moyen privilégié pour prévenir et diminuer toute cause de pollution locale, ponctuelle et accidentelle, pouvant altérer la qualité des eaux prélevées. Leur mise en place est obligatoire autour de tous les captages d'eau destinée aux collectivités humaines. Leur mise en œuvre en Nouvelle-Calédonie est encadrée par la délibération n° 105 du 9 août 1968 réglementant le régime et la lutte contre la pollution des eaux en Nouvelle-Calédonie (article 14).

Cette protection comporte 3 niveaux concentriques établis à partir d'études hydrogéologiques (Figure 57) :

Le périmètre de protection immédiat (PPI) correspond au site de captage. Il est acquis en pleine propriété par le maître d'ouvrage. Clôturé pour éviter toute intrusion, son rôle est d'empêcher la détérioration des installations et le déversement de substances polluantes à proximité du lieu de prélèvement. Hormis les opérations d'entretien, aucune activité n'est permise.

Dans le **périmètre de protection rapproché (PPR)**, de surface généralement plus vaste, toutes les activités susceptibles de provoquer une pollution sont interdites ou soumises à des prescriptions particulières (construction, activité, dépôts...).



Source : DAVAR

Figure 57 : Schéma de représentation des périmètres de protection des eaux

Enfin, la mise en place d'un **périmètre de protection éloigné (PPE)** n'est pas obligatoire. Elle est rendue nécessaire lorsque la réglementation générale est jugée insuffisante et que certaines activités présentant des risques sanitaires doivent être encadrées pour réduire leur impact. Ce périmètre correspond à la zone d'alimentation du captage mais peut s'étendre à l'ensemble du bassin versant.

Le captage du lac de barrage de Yaté et celui de la Wajana sont aujourd'hui les seuls ouvrages pour lesquels des périmètres de protection des eaux ont été définis.

CAPTAGE DU LAC DE BARRAGE DE YATE

Le **PPI** comprend :

- une surface rectangulaire au niveau du plan d'eau entourant le point de captage sur 150 m en amont (ouest), 50 m au nord et 50m à l'est,
- une surface entourant les contours de la plate-forme d'exploitation réalisée.

Les surfaces ci-dessus sont de 2,3 ha sur le lac et 1,3 ha à terre. Le PPI est signalé par des panneaux bien visibles et protégés contre les inondations qui indiquent le point de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine et mentionnent l'interdiction de baignade et les limitations d'accès. Il est clôturé sur la partie terrestre et ceinturé par des bouées sur le lac.

Le **PPR** est de 7 265 ha. Il correspond à une limite située à 200 m au-delà du niveau le plus haut de la retenue, sauf quand la RP3 est à moins de 200 m des berges, auquel cas la route devient la limite.

Le **PPE** est de 37 916 ha. Il correspond au bassin versant d'alimentation du lac de Yaté et intègre également la Rivière des Lacs avec une bande de sauvegarde de 200 m jusqu'aux ponts de la route du Carénage, limitée par les voiries publiques.

CAPTAGE DE LA WAJANA

Comme pour le captage du lac de barrage de Yaté. Le **PPI** comprend :

- une surface rectangulaire au niveau du plan d'eau, entourant le point de captage sur 150 m en amont (ouest), 50 m au nord et 50 m à l'est,
- une surface entourant les contours de la plate-forme d'exploitation réalisée.

La surface du **PPR** est de 3,9 ha et celle du **PPE** est de 320,5 ha et correspond au bassin versant d'alimentation de la Wajana.

5.3 EAUX SOUTERRAINES

5.3.1 Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de conductivité hydraulique et d'emmagasinement disponibles dans le contexte de Goro sont présentées ici.

La conductivité hydraulique (ou la transmissivité qui est le produit de la conductivité et de l'épaisseur des aquifères) est un paramètre important qui conditionne la répartition spatiale des niveaux piézométriques et des flux d'eau souterraine (plus la conductivité hydraulique est basse et plus les niveaux piézométriques seront hauts et les flux seront faibles à recharge équivalente).

L'emmagasinement contrôle, quant à lui, l'ampleur des fluctuations piézométriques. Plus l'emmagasinement est fort, plus les fluctuations seront faibles.

5.3.1.1 Conductivité hydraulique (perméabilité)

Les gammes de conductivité hydraulique mesurées ou estimées sur le plateau de Goro et les bassins adjacents sont les suivantes (Tableau 41) :

Tableau 41: Gammes de conductivité hydraulique mesurées ou estimées suivant les différentes formations géologiques

Formation géologique	Conductivité hydraulique (m/s)	Nombre de mesures
Cuirasse	$> 10^{-4}$	-
Grenaille de fer	$6 \cdot 10^{-7}$	-
Latérite rouge et jaune	$1.1 \cdot 10^{-7}$ à $5.6 \cdot 10^{-5}$	13
Transition/saprolite	$6.6 \cdot 10^{-7}$ à $> 10^{-3}$	8
Péridotite	$6.7 \cdot 10^{-10}$ à $> 10^{-1}$	102
Alluvions	$2.9 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$	2

La comparaison des valeurs de perméabilité entre elles n'est pas aisée du fait de la grande variabilité des méthodes de mesure utilisées (Lugeon, essai par pompage, essai par traçage) qui n'explorent pas les mêmes volumes de terrain.

Néanmoins, ces valeurs montrent notamment que la perméabilité de la péridotite diminue significativement avec la profondeur (

Figure 58). Cette distribution s'apparente tout à fait aux résultats obtenus sur les massifs cristallins (par exemple Stober et Bucher, 2007).

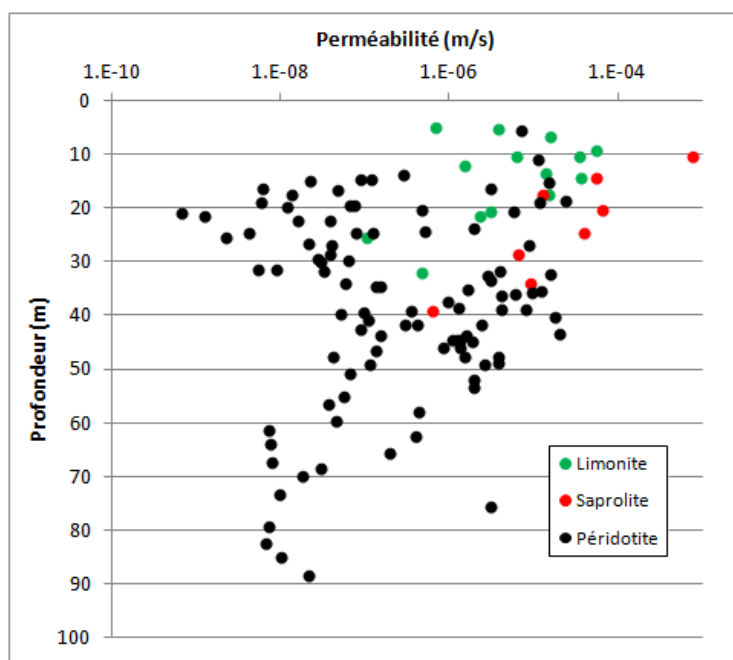


Figure 58 : Distribution de la perméabilité de la péridotite mesurée en fonction de la profondeur dans le contexte de Goro

5.3.1.2 Coefficient d'emmagasinement et de porosité

✎ Se référer aux documents – Long-term pumping test. West Kwe residue storage facility. Goro Nickel project (Golder, 2008a) et Modélisation hydrogéologique de l'aire de stockage de résidus miniers Kwé Ouest (Golder, 2008b)

Sur la base d'un essai par pompage effectué à la source WK17 (bassin de l'aire de stockage des résidus miniers de la Kwé Ouest), GOLDER (2008a) obtient une plage de valeur allant de 0,003 à 0,04 pour l'unité transition-saprolite. Ces valeurs sont cohérentes avec le caractère captif de la

nappe profonde. Pour les autres unités hydrogéologiques, GOLDER (2008b) propose des valeurs issues de la calibration du modèle hydrogéologique de l'aire de résidus de la Kué Ouest (Tableau 42 et Tableau 43).

Tableau 42 : Porosité effective suivant les différentes unités hydrogéologiques

Unité hydrogéologique	Porosité effective
Latérite rouge et jaune	0,04
Transition / saprolite	0,0075
Péridotite	0,006
Alluvions	0,2

Ces valeurs sont à comparer avec celles issues d'une analyse réalisée en janvier 2002 sur des forages carottés de 200 mm de diamètre localisés dans l'emprise de la future fosse minière.

Tableau 43 : Porosité totale pour les différentes formations géologiques

Formation géologique	Porosité totale	Nombre d'échantillons	Nombre de forage
Cuirasse/ grenaille	0,52	91	30
Latérite rouge	0,72	67	8
Latérite jaune	0,76	211	9
Transition	0,78	30	9
Saprolite	0,57	144	11

Pour les latérites et la transition-saprolites les fortes différences constatées entre la porosité totale et la porosité effective montrent clairement que seule une très faible partie de l'eau présente dans ces formations peut effectivement participer aux écoulements souterrains. La majorité de l'eau est piégée dans la porosité en raison d'une très faible granulométrie des matrices constituant ces formations. Cela signifie que les nappes présentes dans ces formations, même lorsqu'il s'agit de nappes libres (cas de l'aquitard latéritique et des nappes dans le socle au niveau des crêtes de péridotite), vont présenter des valeurs de diffusivité (rapport de la transmissivité sur le coefficient d'emménagement) et des caractéristiques proches de celles d'une nappe captive (rapidité des réactions piézométriques, capacité à porter des variations de pression sur de longues distances). Leur capacité de drainage est également très faible.

5.3.2 Recharge des nappes

Sur la base des bilans hydrologiques présentés au paragraphe 5.2.6, la recharge des nappes sur le bassin de la Kwé est évaluée à 903 mm/an sur la période 1998-2010. Elle représente 29 % de la pluie et 43% de la pluie efficace.

5.3.3 Grandes directions d'écoulement dans le profil d'altération

 Se référer aux documents– Synthèse des observations piézométriques – Secteur de Goro (A2EP, 2012b) et Synthèse des observations piézométriques – Secteur de Goro : Analyses complémentaires pour la période 2011 à 2013 (A2EP, 2014b).

Les données piézométriques acquises sur le secteur de Goro ont fait l'objet d'une analyse spécifique réalisée en 2 temps (A2EP, 2012b ; puis A2EP, 2014b). Ces 2 rapports sont fournis dans le CD-ROM des études de référence.

Une synthèse des principaux résultats obtenus est présentée ci-après.

5.3.3.1 Choix des périodes hydrologiques analysées

Les esquisses piézométriques ont été établies en dehors des périodes pluvieuses, afin de s'affranchir d'éventuels biais d'observations liés à des temps de réactions piézométriques pouvant varier d'un ouvrage à un autre. Le choix des périodes correspond à un compromis entre la période hydrologique et le nombre de données disponibles.

Les deux périodes retenues sont août 2012 pour les basses eaux (début de la période d'étiage) et avril 2013 pour les hautes eaux (fin de la saison des pluies). Ces périodes sont indiquées en rouge sur la Figure 59.

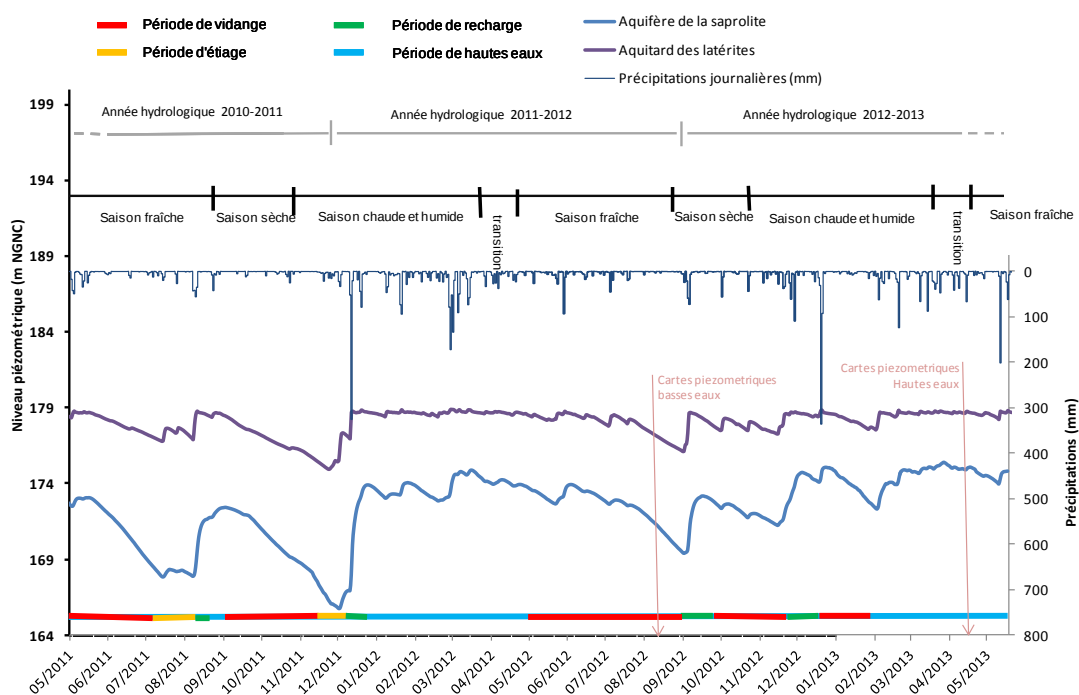


Figure 59 : Chronique du niveau piézométrique enregistré dans le piézomètre 10EX0221, périodes hydrologiques, années hydrologiques et saisons.

La période d'octobre 2012 n'a pas été utilisée pour les basses eaux, une partie de la campagne de relèvement ayant été effectuée après un événement pluvieux qui a conduit à la recharge de la nappe.

5.3.3.2 Aquifère principal

 Se référer aux cartes D14 et D15

Les esquisses piézométriques présentées sur les cartes D14 et D15 permettent de visualiser la surface piézométrique et de repérer le sens et la direction des écoulements dans l'aquifère durant la période de basses et hautes eaux.

Les cartes distinguent les axes de drainage et les limites de partages des eaux (représentés par des tirets orange).

Les axes drainants s'expliquent généralement par la présence de vallées encaissées ou de talwegs empruntés par le réseau hydrographique. Ces axes de drainage dans les vallées sont généralement associés à une augmentation importante du gradient piézométrique horizontal.

Des axes de drainage de la nappe dont l'emplacement est indépendant de la position des rivières sont mis en évidence dans la plaine de KO4 et à la limite avec le secteur SMLT. Ces axes entraînent une déformation des courbes isopièzes et une convergence des écoulements sans augmenter de façon importante le gradient piézométrique.

Les axes de drainage sont présentés ci-dessous :

- l'axe de drainage observé dans le secteur de KO4 (indiqué par les chevrons formés par les courbes isopièzes) s'inscrit dans une vaste plaine, avec des gradients piézométriques peu marqués à l'ouest et plus accentués à l'est. Dans ce secteur, les courbes isopièzes indiquent que les écoulements convergent tous vers un axe nord-ouest/sud-est. Cet axe drainant est décalé vers l'est par rapport à l'axe de la vallée. Un axe de drainage secondaire apparaît pendant la période de basses eaux en provenance de la bordure du secteur SMLT. L'axe de drainage principal se prolonge vers les crêtes situées au nord de la plaine. Par extrapolation, en prolongeant les axes de drainage vers le sud, on rencontre un secteur parsemé de dolines puis, en recoupant la rivière Kwé Ouest, on trouve deux sources. Il est probable que ces axes de drainage soient situés dans une zone fracturée qui pourrait être connectée aux sources situées en aval ;
- les axes de drainage observés au nord (Camp de la géologie et secteur situé à proximité de l'ancien aérodrome) sont dirigés vers les crêtes pendant les périodes de basses eaux et ils disparaissent pendant les périodes de hautes eaux. La crête située au bord de cette zone de convergence présente une concentration importante de linéaments. La convergence des écoulements souterrains et la présence de linéaments sont des indices qui pourraient indiquer la présence d'un ou plusieurs conduits souterrains susceptibles de détourner une partie de l'eau souterraine en dehors de la plaine des lacs ;
- tous les autres axes de drainage sont associés à des vallées plus ou moins profondes où s'écoulent les rivières. On observe une augmentation systématique du gradient piézométrique de part et d'autre de ces vallées pour les deux périodes hydrologiques. Cette augmentation des gradients piézométriques est induite par l'augmentation de déclivité du terrain.

Les limites de partage des eaux de l'aquifère de la saprolite, identifiées sur la base des courbes isopièzes interpolées et extrapolées au niveau des crêtes, sont décrites ci-dessous :

- au nord de la zone couverte par l'esquisse piézométrique, dans la partie méridionale de la plaine des lacs, les lignes de partage des eaux souterraines indiquent qu'une partie des écoulements se dirige vers la crête qui sépare le plateau de Goro et la plaine des lacs ;
- au nord-est de la zone couverte par l'esquisse piézométrique, on trouve une limite de partage des eaux qui sépare les eaux souterraines qui seront drainées par la Kué Binyi et celles qui seront drainées par la Kwé Nord. Cette séparation est induite par une remontée du substratum rocheux qui a permis la formation d'un dôme piézométrique par lequel passe la limite de partage des eaux ;
- au nord-est de la carte, une ligne de partage sépare les eaux souterraines drainées par l'affluent est de la Kwé Nord (KN1) d'une part, et le reste de la Kwé Nord d'autre part ;
- le lac Xéré Wapo est situé à l'intersection des lignes de partage des eaux souterraines entre la Kwé Nord, la rivière de l'entonnoir et la rivière Wajana ;

- au sud du lac Robert, les eaux souterraines s'orientent soit vers l'ouest en direction de l'endoréique de la Kwé Est, soit vers l'est en direction de l'entonnoir.

Sept points de capture du réseau hydrographique ont été matérialisés sur les cartes. Ils correspondent aux exutoires des bassins versants endoréiques repérés sur le site de Goro. Les courbes isopièzes s'organisent, de manière concentrique, autour de ces points de capture et les axes de drainage convergent vers ces points.

5.3.3.3 *Aquitard latéritique*

 Se référer aux cartes D16 et D17

Les cartes D16 et D17 présentent les esquisses piézométriques du niveau aquitard des latérites pour la période de basses eaux et la période de hautes eaux respectivement. Selon le même principe que précédemment, ces cartes présentent les axes de drainage et les lignes de partage des eaux.

L'emplacement et la forme des lignes qui matérialisent les axes de drainage et les lignes de partage des eaux sont globalement identiques à celles qui sont matérialisées pour l'aquifère principal.

Les différences les plus importantes entre l'aquifère et l'aquitard se situent dans la plaine de KO4 pour les deux périodes hydrologiques et sur la limite avec le secteur de SMLT pour la période de hautes eaux.

Les constats suivants sont formulés pour le secteur KO4 :

- dans la plaine de KO4, on trouve un axe de drainage qui remonte quasiment jusqu'au pied de la crête située au nord-ouest de la carte. Cet axe de drainage est bien marqué dans l'aquifère et dans l'aquitard, mais sa position diffère suivant la période hydrologique et le réservoir hydrogéologique considéré ;
- quelle que soit la période hydrologique (hautes eaux ou basses eaux), l'axe de drainage de l'aquifère est décalé vers l'est par rapport à l'axe de la vallée. Pendant la période de basses eaux, des ramifications de l'axe de drainage principal se mettent en place à l'est de la plaine ;
- dans l'aquitard, l'axe de drainage principal est globalement superposé à l'axe de la vallée. En période de basses eaux, un axe de drainage secondaire se met en place à l'est de la plaine et draine les eaux souterraines de l'aquitard vers la bordure de la plaine de SMLT et la rivière KO5. L'est de la plaine qui est drainé par l'axe de drainage secondaire est isolé du reste de l'aquitard par une limite de partage des eaux souterraines.

Les constats suivants sont formulés à la limite entre le secteur SMLT et le secteur de KO4 :

- la surface piézométrique de l'aquifère de la saprolite est relativement plane et la direction des écoulements indiquent que l'eau se dirige vers l'intérieur de la plaine de KO4 et non vers le secteur de SMLT. A l'inverse, comme l'indiquent les axes de drainage figurés sur la carte, une partie des eaux souterraines de l'aquitard des latérites est drainée depuis la bordure est de la plaine de KO4 vers le secteur SMLT ;
- ce contraste entre l'aquitard des latérites et l'aquifère de la saprolite est mis en évidence en période de basses eaux mais disparaît pendant la période de hautes eaux ;
- le déplacement de la ligne de partage des eaux du niveau aquitard pendant la période de hautes eaux induit une déformation des limites du bassin hydrogéologique. Cette déformation permet à la ligne de partage des eaux de se rapprocher des limites du bassin

versant topographique. Ce constat suggère que, dans ce secteur, le gradient topographique contrôle les niveaux piézométriques dans l'aquitard pendant la période de hautes eaux.

5.3.4 Analyse des amplitudes piézométriques

 Se référer aux cartes D18 et D19

Pour étudier la dynamique des nappes, l'amplitude des variations du niveau piézométrique a été analysée à partir des valeurs extraites pour l'ensemble des piézomètres pour lesquels on dispose de données allant du 14 octobre 2012 et le 31 mai 2013.

Les résultats obtenus sont présentés dans les cartes D18 et D19 respectivement pour l'aquitard et l'aquifère.

Selon les piézomètres, les amplitudes observées peuvent varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

La répartition spatiale des amplitudes piézométriques n'est pas uniforme. Tous secteurs confondus, trois grandes caractéristiques peuvent être définies :

- l'amplitude piézométrique augmente à proximité des crêtes et des zones de transition entre les plateaux et les axes des vallées principales ;
- l'amplitude est plus faible à l'intérieur des plateaux et en bordure des rivières au fond des vallées encaissées ;
- les amplitudes les plus faibles (entre 1 et 2 m) sont observées dans l'aquitard à proximité des principaux lacs situés sur le plateau de Goro.

Parmi les secteurs couverts par l'analyse on observe deux zones pour lesquelles l'amplitude piézométrique semble anormalement élevée compte tenu de l'éloignement par rapport aux crêtes. Il s'agit de la partie est de la plaine de KO4 et la partie nord-ouest du plateau de Goro. Dans ces secteurs, l'amplitude du niveau piézométrique peut atteindre 15 à 30 m dans l'aquifère et dans l'aquitard. Or, ces gammes de valeurs sont généralement observées dans l'aquifère principal au niveau des chaînons rocheux. Ce comportement singulier pourrait signifier qu'il s'agit de secteurs privilégiés d'alimentation des nappes ou encore de zones où le substratum rocheux est proche de la surface.

5.3.5 Caractérisation du comportement captif ou libre de la nappe présente dans l'aquifère principal

 Se référer aux cartes D20 et D21

L'aquifère contient une nappe d'eau souterraine qui présente deux comportements (Figure 60):

- captif (ou semi captif) lorsque la surface piézométrique de cette nappe est située au-dessus du toit de l'aquifère (le toit de l'aquifère correspond à l'interface entre la zone de transition et les matériaux saprolitiques). L'aquifère est totalement saturée et l'eau est sous pression (Figure 60B) ;
- nappe à surface libre lorsque la surface piézométrique est située en dessous du toit de l'aquifère. L'aquifère présente alors une zone non saturée. La surface piézométrique de l'aquifère et la surface de la nappe sont confondues. La pression à la surface de la nappe correspond à la pression atmosphérique (Figure 60C).

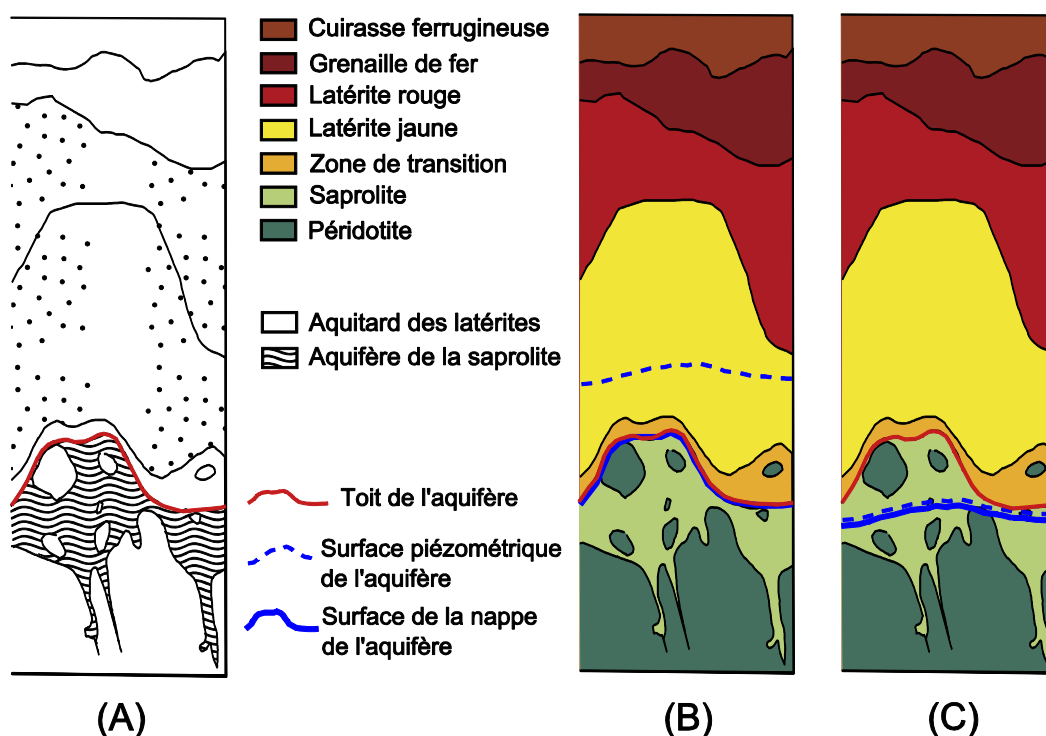


Figure 60 : Comportements de la nappe suivant la position de la surface piézométrique par rapport au toit de l'aquifère.

En comparant la position du toit de la saprolite (déduite à partir des données issues des sondages géologiques) avec la surface piézométrique (extraite des esquisses piézométriques de l'aquifère), on peut déterminer la pression de l'eau dans la nappe par rapport à la position du toit de l'aquifère. Cette pression permet de déterminer sur le comportement de la nappe (captif ou libre).

Cette analyse a été réalisée pour les deux périodes hydrologiques pour lesquelles les esquisses piézométriques ont été créées. Pour la période de basses eaux (août 2013), les résultats sont présentés dans la carte D20. Les résultats pour la période de hautes eaux (avril 2013) sont présentés dans la carte D21.

Les résultats montrent que le comportement de la nappe de l'aquifère est principalement captif (ou semi-captif). Elle devient libre à proximité des crêtes (pied des crêtes) et des vallées encaissées. Pendant la période de hautes eaux, les secteurs où la nappe est libre régressent sous l'effet de l'augmentation de la pression hydrostatique dans l'aquifère.

5.3.6 Analyse des gradients piézométriques verticaux

 Se référer aux cartes D22 et D23

Les plateformes piézométriques sur le site de Goro permettent de connaître le différentiel de pression hydrostatique entre l'aquitard et l'aquifère. Avec les coupes techniques des ouvrages, on peut déterminer la distance entre les crépines des piézomètres. La valeur du gradient piézométrique s'obtient alors en divisant le différentiel de pression hydrostatique (ΔH) par la distance qui sépare le milieu des crépines (L) (Figure 61).

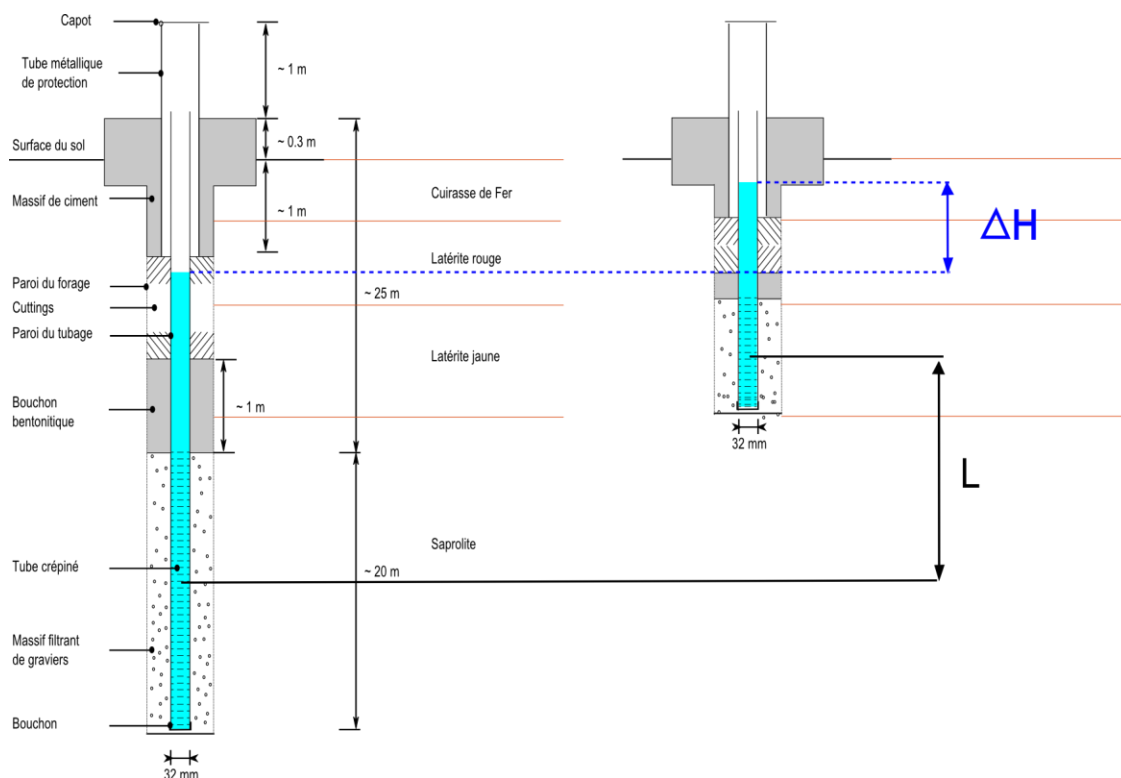


Figure 61 : Coupe schématique d'une plateforme piézométrique

Ce gradient correspond à la composante verticale des écoulements. La valeur du gradient est négative quand les écoulements sont verticaux descendants et signifie que l'aquitard est drainé par l'aquifère. La valeur du gradient est nulle dans les secteurs sur lesquels il n'y a pas d'échange entre l'aquitard et l'aquifère. Le gradient est positif quand les écoulements sont verticaux ascendants et signifie que l'aquitard est alimenté en eau par l'aquifère. La valeur absolue du gradient traduit l'intensité des échanges entre les deux réservoirs.

L'analyse des gradients piézométriques verticaux a été réalisée pour les deux périodes hydrologiques (Hautes eaux « Avril 2013 » et basses eaux « Août 2012 »). À partir des différentes valeurs du gradient piézométrique, deux esquisses des courbes isogradients ont été construites. Les résultats de l'analyse sont présentés aux cartes D22 et D23 respectivement pour la situation de basses eaux et de hautes eaux.

L'analyse révèle que l'aquitard est pratiquement toujours drainé par l'aquifère car les gradients verticaux sont en grande majorité descendants quelle que soit la période hydrologique. L'intensité des gradients n'est pas uniforme à l'échelle du site de Goro. Les intensités du gradient se situent dans une gamme comprise entre 1% et -94% pour la période de basses eaux et entre 7% et -108% pour la période de hautes eaux.

Les valeurs du gradient les plus élevées se situent dans la partie est de la plaine de KO4, au nord est de la plaine de SMLT et au sud de la plaine de SMLT le long du versant qui borde la rivière Kwé Ouest. Pour le secteur FM25, les valeurs les plus fortes se situent au nord-ouest en direction de la crête, à proximité des rivières qui drainent le plateau (Kwé Nord et Kwé Est) et à la périphérie est du plateau.

Les motifs formés par les courbes d'isogradient n'évoluent pratiquement pas entre les deux périodes hydrologiques. Le seul changement majeur concerne la plaine de KO4. Dans ce secteur, les courbes d'isogradient qui décrivent une large plage de valeurs fortes pendant la période de

basses eaux régressent pendant la période de hautes eaux en formant trois patches alignés dans la direction nord-ouest/sud-est.

5.3.7 Synthèse des observations piézométriques

Les principales caractéristiques du fonctionnement hydrogéologique du profil d'altération sont présentées ci-dessous.

Aquitard Latéritique

L'extension latérale de l'aquitard des latérites est limitée par le pied des crêtes. Cependant, l'aire d'alimentation de l'aquitard peut s'étendre jusqu'aux lignes de crêtes car le ruissellement sur les crêtes peut participer à la recharge dudit aquitard.

L'aquitard contient une nappe d'eau à surface libre. La nappe est pérenne à l'intérieur des plaines et des plateaux. Son existence peut être temporaire au pied des crêtes ou dans les versants des grandes vallées qui entaillent le bassin de la Kwé.

La surface de la nappe est globalement parallèle à la topographie. A l'intérieur des plaines et des plateaux, elle est généralement très proche de la surface du sol. Les amplitudes de variation des niveaux piézométriques y sont plus faibles. En se rapprochant des crêtes et des vallées encaissées, l'amplitude augmente.

La nappe située dans l'aquitard est très réactive aux précipitations.

Aquifère principal

La nappe d'eau dans l'aquifère principal est captive (ou semi-captive) dans les plaines et à l'intérieur des plateaux. Au pied des crêtes, dans les crêtes et dans les vallées, la nappe de l'aquifère devient libre. Les secteurs où la nappe est captive peuvent régresser en fonction des situations hydrologiques.

La surface de la nappe est globalement parallèle à la topographie sauf dans le secteur de KO4.

Les amplitudes de fluctuation des niveaux piézométriques dans l'aquifère sont généralement comparables à ceux observés dans l'aquitard. Elles augmentent à mesure que l'on se rapproche des crêtes et des axes des vallées. Les amplitudes les plus fortes sont observées au pied des crêtes et dans les crêtes.

Les gradients piézométriques verticaux montrent que des échanges d'eau se font la plupart du temps de l'aquitard vers l'aquifère. L'intensité du gradient est plus élevée à proximité des axes de drainage et dans les secteurs sur lesquels la nappe de l'aquifère devient libre.

5.3.8 Connexions interbassins prouvées

 Pièces graphiques – Carte D24 – Localisation des bassins endoréiques et connexions interbassins

 Se référer aux documents :

- Cartographie des dolines à l'aide des données Lidar (Géo Impact, 2010) et Réalisation d'un traçage à la fluorescéine au niveau du secteur Entonnoir – Cascade. Compte rendu de la mission de terrain (EMR, 2010)
- Réalisation d'une opération de traçage au niveau des eaux souterraines de la verse à stériles - Bassin de la Kwé Est – Goro Nickel - Commune de Yaté (A2EP, 2008)
- Réalisation d'un traçage à la fluorescéine au niveau de la VSKE (EMR 2009)

- *Groundwater Mapping and Tracing Study - East Kwe Waste Disposal Areas (Golder, 2002b)*
- *Réalisation de traçages à la fluorescéine au niveau des secteurs Entonnoir-Cascade et Gouffre-Captage (EMR, 2011)*

Ces connexions interbassins sont de 2 natures différentes :

- une connexion directe due à une continuité géologique et hydrogéologique du profil d'altération qui se partage entre plusieurs bassins ;
- des connexions indirectes au travers des crêtes rocheuses via une faille qui peut ou non être concernée par des processus de karstification et par conséquent peut ou non porter un système pseudo karstique (au sens hydrogéologique du terme).

Dans le secteur d'étude, la seule connexion directe concerne la zone du trou du Tahitien située au nord-est du plateau de Goro et qui met en contact la plaine des lacs et le bassin de la Kwé Nord. Dans ce secteur, les données piézométriques disponibles montrent que les eaux souterraines de la plaine des lacs sont drainées à la fois par la Kwé Nord et par la Kué Binyi.

La position de la limite de partage des eaux souterraines entre ces 3 identités (plaine des lacs, Kué Binyi et Kwé Nord) n'est pour le moment pas connue. Un plan d'actions a été défini et est en cours de mise en œuvre. Sa durée prévisionnelle est de 3 ans. Ce plan inclut notamment la réalisation d'une étude hydrogéologique spécifique au Trou du Tahitien dans le cadre d'une extension du projet CNRT HYPERK. Cet objet correspond à la plus grande et la plus profonde doline répertoriée dans le secteur d'étude.

Pour ce qui concerne les connexions indirectes, un effort important a été consacré dès 2008 à la caractérisation des endoréismes et des phénomènes pseudo-karstiques associés. Ces efforts ont principalement porté sur :

- la caractérisation théorique des systèmes pseudo-karstiques et de leur fonctionnement à l'aide d'une approche bibliographique ;
- la cartographie et la caractérisation morphologique systématique de l'ensemble des dépressions topographiques fermées sur le bassin de la Kwé (Port boisé compris) à l'aide de données topographiques LIDAR (Géo Impact, 2010) ;
- une recherche systématique des bassins versants endoréiques de dimension significative par extraction automatisée (logiciel TOPAZ) à l'aide des données LIDAR disponibles ;
- la mise en œuvre d'essais par traçage et d'analyses de données piézométriques disponibles notamment sur les principaux bassins endoréiques.

A l'issue de ce travail, il est possible de considérer que l'essentiel des bassins endoréiques et des connexions interbassins a été répertorié. Les connexions hydrauliques indirectes prouvées entre le bassin de la Kwé et les bassins voisins présentées ci-dessous (Carte D24) :

- au nord, la rivière KN1 (bassin de la Kwé Nord) est connectée au bassin endoréique du creek de la plaine des lacs dont la superficie est de 1,56 km² (EMR, 2010). La vitesse apparente de transfert du traceur utilisé (fluorescéine) est de 170 m/h.
- un ensemble remarquable de 4 bassins connectés en cascade est situé en bordure sud-est de la Kwé. Le bassin endoréique de la Kwé Est amont est relié à la rivière Truu (Source TR02) par un système pseudo-karstique dont l'axe de drainage orienté nord-sud fait 1,5 km de long (A2EP, 2008 ; EMR, 2009). La vitesse apparente de transfert du traceur est de 100 m/h. Les essais par traçage ont montré clairement que la rivière Truu était le point de sortie principal du système karstique (80 % du traceur a été retrouvé à la source TR02).

Néanmoins une faible proportion a traversé la crête séparant cet endoréique et le bassin de l'Entonnoir en 4 jours (GOLDER, 2002b). La faible vitesse apparente de transfert (de l'ordre de 6 m/h) suggère qu'il s'agit d'une modalité d'écoulement en milieu fissuré et non d'un système pseudo-karstique ;

- l'Entonnoir est un bassin endoréique (1,15 km²) connecté au bassin Cascades (ancienne mine des Japonais). L'axe de drainage orienté nord-sud fait 500 m de longueur. La vitesse apparente de transfert du traceur est de l'ordre de 170 m/h (EMR, 2011) et son taux de récupération est très élevé (plus de 90 %), ce qui suggère que ce pseudo-karst a un point de sortie unique. L'essai a également montré l'absence de connexion entre l'Entonnoir et la rivière Wajana en contexte de hautes eaux. Ce constat peut être étendu au contexte des moyennes et basses eaux car les hautes eaux correspondent à une situation dans laquelle l'énergie hydraulique disponible est maximale. Le pseudo-karst était donc pleinement fonctionnel lors de la réalisation du traçage ;
- le bassin Cascade est un endoréique de 2,02 km² connecté à la rivière Truu (source du captage de la Truu). L'axe de drainage est orienté nord-sud et a une longueur de 700 m. Le fort taux de récupération du traceur à la source (plus de 90 %) suggère que ce système a un point de sortie unique. La vitesse apparente de transfert est de l'ordre de 70 m/h (EMR, 2011), ce qui est faible par rapport aux autres systèmes étudiés. Sur la base des éléments décrits dans le volet C « Cadre hydrogéologique », il est fait l'hypothèse que ce système pseudo karstique est en phase de déclin avec un axe de drainage en cours de colmatage ;
- les données piézométriques disponibles montrent sans ambiguïté que le bassin endoréique de la Kwé Ouest se vidange par voie souterraine dans la baie du Port Boisé. Les limites géographiques du bassin endoréique ne sont pas connues avec précision. Sa superficie serait de l'ordre de 0,68 km². Au regard des observations disponibles, il est fait l'hypothèse que ce bassin est associé à un système pseudo karstique fossile dont l'axe de drainage serait plus ou moins colmaté.

5.3.9 Connexions interbassins suspectées

 *Pièces graphiques – Carte D24 – Localisation des bassins endoréiques et connexions interbassins*

Dans certains secteurs, un certain nombre d'indices hydrologiques, piézométriques ou géomorphologiques sont concordants et permettent de suspecter l'existence de connexions interbassins sans que cela soit totalement démontré par des essais par traçage. Les connexions interbassins suspectées sont les suivantes.

5.3.9.1 Connexion Grand Lac – KO4 : Axe Grand Lac

 *Se référer aux cartes D25, D26, D27, D28 et D29*

 *Se référer aux documents :*

- Notice de la carte morphostructurale. Secteur KO4, SMLT, Kaori, Kadji et plaine des lacs (sud) (A2EP, 2011)
- Campagne de tomographie électrique 2D sur le bassin de DROSE (KO4) (Geophysical 2009)
- Campagne de tomographie électrique 2D au droit de l'axe Grand Lac (VNC, 2012)
- Secteur du Camp de la Géologie - Investigations hydrogéologiques par réalisation d'un forage profond et de tests par pompage (A2EP, 2013)

- Complément de mesures RMP ciblées sur le bassin KO-4, suite au test de Novembre 2011 (BRGM, 2012)

Le caractère atypique de la surface piézométrique de l'aquifère principal dans KO4 a conduit à s'interroger sur l'existence d'une connexion hydraulique avec le Grand lac.

Pour mémoire, un axe de drainage est observé dans le bassin de KO4. Cet axe est décalé de l'ordre de 200 m vers le nord-est par rapport au centre de la vallée. Il est situé au droit d'une grande faille d'orientation N140° qui marque non seulement la morphologie du toit du bedrock dans KO4 (zone d'épaississement du profil d'altération) mais également la morphologie du paysage vers l'amont (zone d'affaissement de la crête rocheuse entre le Grand Lac et KO4) et vers l'aval (bassin endoréique de la Kwé Ouest).

Les cartes D25 et D26 montrent le fonctionnement hydraulique de l'aquitard et de l'aquifère le long de cet axe en situation de basses et de hautes eaux respectivement. En situation de basses eaux, l'effet de drainage de l'aquifère sur l'aquitard est visible même sur la partie amont de l'axe. Il s'intensifie rapidement vers l'aval si bien que la composante horizontale des écoulements dans l'aquitard finit par pratiquement disparaître.

En situation de hautes eaux, les équipotentielles se redressent ce qui suggère que l'axe de drainage atteint sa capacité maximale de transfert d'eau au moins dans sa partie amont. Vers l'aval, le drainage de l'aquitard perdure.

Vers l'aval, la présence de 2 sources dans le prolongement de cet axe semble indiquer l'existence d'une possible relation hydraulique entre ces dernières et la nappe principale. Pour au moins l'une d'elles (source de la rivière KO5), le débit spécifique d'étiage est très important et constitue clairement une anomalie par rapport à ce qui est généralement observé.

Lors d'une situation de sécheresse exceptionnelle observée entre novembre 2005 et janvier 2006, le débit spécifique de la rivière KO5 en aval de la source était de 26 l/s/km² contre 1 l/s/km² immédiatement en amont. Ce débit spécifique est équivalent à celui de la Kwé Nord dont le bassin versant topographique fait 10,89 Km² (contre 3,97 Km² pour la rivière KO5)

Afin de caractériser cette connexion potentielle, les investigations suivantes ont été réalisées entre 2012 et 2013 (Carte D27).

- étude structurale de KO4 et cartographie des linéaments (A2EP, 2011) ;
- mise en place de 9 piézomètres entre le chaînon rocheux et le Grand Lac à l'intérieur du camp de la Géologie de VNC et suivi des évolutions piézométriques à fréquence horaire depuis août 2012 ;
- campagne de tomographie électrique afin de localiser la zone de passage de la faille à proximité du Grand lac (VNC, 2012). Ces investigations viennent en complément d'une campagne de tomographie électrique (campagne DROSERA) réalisée à l'échelle du bassin de KO4 (Géophysical, 2009) ;
- évaluation de la perméabilité des terrains au droit de la faille par réalisation d'un essai par pompage de longue durée (A2EP, 2013) ;
- réalisation d'un essai par traçage de longue durée (cet essai n'a donné aucun résultat tangible) ;
- réalisation de sondages RMP (Résonance Magnétique des Protons) au droit de la zone supposée de passage de l'axe de connexion entre le Grand Lac et KO4 (BRGM, 2012). Ce travail a été réalisé en marge d'un projet plus global de test de méthodes d'investigation

géophysique à vocation hydrogéologique et géotechnique porté par VNC et mené par le BRGM (projet de méthodologie géophysique « Karst & Dolines »).

Les résultats obtenus sont les suivants :

- dans la zone supposée de passage de l'axe de connexion entre le Grand Lac et KO4, les sondages RMP n'ont donné aucun résultat exploitable. Au niveau du Grand lac, le bruit électro magnétique généré par l'activité humaine sur le camp de la Géologie rend caduque l'utilisation de la méthode RMP. Coté KO4, les signaux RMP mesurés sur les 5 sondages situés à proximité immédiate du pied de crête ont été considérés comme non significatifs ;
- coté Grand lac, sur les 3 lignes de tomographie électriques réalisées, une seule permet de localiser précisément la zone de passage de la faille qui pourrait guider l'axe de connexion suspecté (Carte D28). Coté KO4, il n'y a pas nécessairement de corrélations évidentes entre l'analyse morpho-structurale et les campagnes de reconnaissances géophysiques. En définitive, ce sont les observations piézométriques qui permettent le mieux de localiser géographiquement cette faille via l'effet de drainage qu'elle engendre sur l'aquifère principal ;
- le suivi piézométrique réalisé coté Grand Lac montre clairement l'existence de phénomènes saisonniers d'inversions des directions d'écoulements des eaux souterraines (Cartes D28 et D29). En situation de basses eaux, une dépression piézométrique apparaît à proximité immédiate du pied de crête (le niveau piézométrique passe en dessous du niveau d'eau dans le Grand lac). En l'absence de précipitations, cette dépression s'étend assez rapidement (1 à 2 semaines) en direction du Grand Lac le long des zones faillées supposées. Au cours de cette période, une limite de partage des eaux souterraines se met en place entre le Grand Lac et la crête. Au sud de cette limite, les écoulements souterrains sont dirigés vers la crête. Au nord, les eaux s'écoulent vers le lac. Sur la base des données piézométriques disponibles, la zone de capture des eaux souterraines par la faille aurait une superficie de l'ordre de 12 ha. Elle correspond à une petite partie du flanc nord de la crête séparant la plaine des lacs du bassin KO4. Dès l'arrivée de pluies significatives, la dépression topographique disparaît en quelques jours ce qui tend à montrer que les volumes de pluie infiltrée au cours d'un épisode pluvieux sont plus importants que les flux transitant le long de la faille. La rapidité du phénomène suggère que la perméabilité du système faillé est faible ;
- afin de confirmer ce point, un essai par pompage de 48h a été réalisé en avril 2013 (situation de hautes eaux). Pour l'occasion, un forage de 70,5 m de profondeur a été implanté au droit de la zone faillée sur la base des résultats obtenus lors de la campagne de tomographie électrique. Le fond de la zone crépinée est situé à l'altitude 207 m NGNC soit une quinzaine de mètres en dessous de la surface topographique de la partie amont du bassin KO4 (Cartes D25 et D26). La perméabilité obtenue est effectivement modeste ($5 \text{ à } 6.10^{-7} \text{ m/s}$) mais ce résultat doit être nuancé parce qu'un colmatage partiel du forage a pu se mettre en place lors des pompages. Néanmoins, au cours de la foration de l'ouvrage (foration à l'air), les venues d'eau rencontrées étaient faibles. Sur cette base, la perméabilité du système faillé au droit du forage de pompage peut être considérée comme peu importante.

Ces résultats permettent de considérer que la probabilité d'existence d'une connexion entre la plaine des lacs et le bassin de KO4 est très forte. Sur la base des données piézométriques disponibles, cette connexion apparaît saisonnière. Entre août 2012 et janvier 2014, la dépression piézométrique en pied de crête a été observée 6 fois (Figure 62 et Figure 63 ; Voir carte D28 ou D29 pour la localisation des piézomètres). Néanmoins, il est possible que la fuite d'eau en direction

de KO4 soit pérenne et que l'effet de drainage des eaux souterraines par la faille soit simplement masqué par l'effet de recharge apportée par les précipitations. Sur la base de la valeur de perméabilité obtenue lors de l'essai par pompage, il est considéré que le débit de fuite le long de cet axe de connexion est très faible.

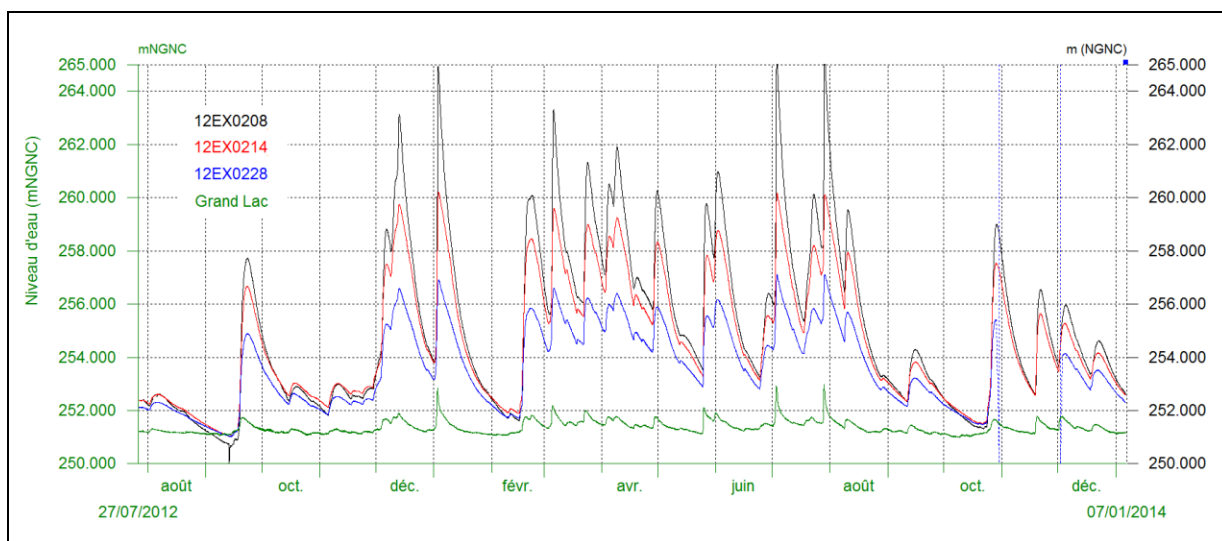


Figure 62: Secteur Grand Lac : Evolution comparée des niveaux piézométriques et du niveau du Grand lac entre août 2012 et janvier 2014. Piézomètres 12EX0208, 12EX0214 et 12EX0228

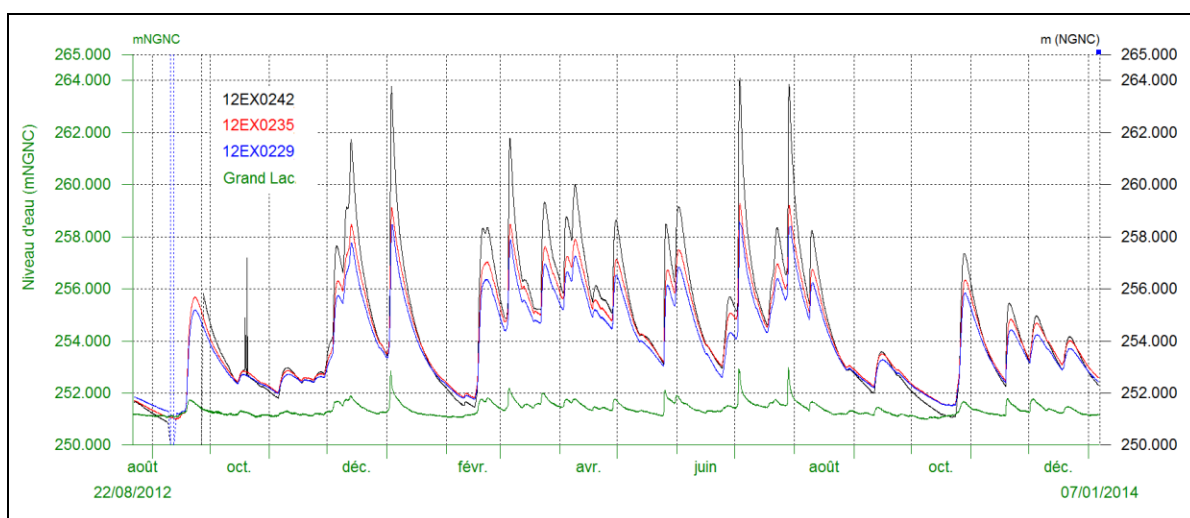


Figure 63: Secteur Grand Lac : Evolution comparée des niveaux piézométriques et du niveau du Grand lac entre août 2012 et janvier 2014. Piézomètres 12EX0242, 12EX0235 et 12EX0229

La question du drainage du Grand Lac par l'axe de connexion demeure. Lors de la période la plus sèche sur la période d'observation (septembre 2012), La différence de niveau entre le Lac et les 2 piézomètres les plus proches (12EX0228 et 12EX0229) est très faible (Figure 64) ce qui a motivé la réalisation d'un contrôle des repères de mesure par un cabinet de géomètre (Théome, 2012). Durant cet étiage, la limite de partage des eaux entre le Grand lac et la dépression piézométrique semble disparaître ponctuellement au droit du piézomètre 12EX0228 qui est très proche d'une zone possible de passage de la faille. Cette observation suggère que la dépression piézométrique pourrait s'étendre jusqu'au Grand lac et mettre ce dernier en continuité hydraulique avec le bassin KO4.

La limite de partage des eaux entre le lac et la crête peut être vue comme une limite saisonnière en ce qu'elle disparaît entièrement ou partiellement lors des étiages importants ou une limite permanente mais discontinue (puisque à proximité immédiate des zones faillées, la connexion entre le Grand lac et KO4 est permanente et qu'ailleurs, il n'y a pas connexion). Ce dernier cas peut paraître ambigu dans la mesure où les niveaux observés sur 12EX0228 sont généralement plus hauts que les niveaux d'eau du Grand lac. Là encore, il faut imaginer que la recharge pourrait gommer les effets de drainage.

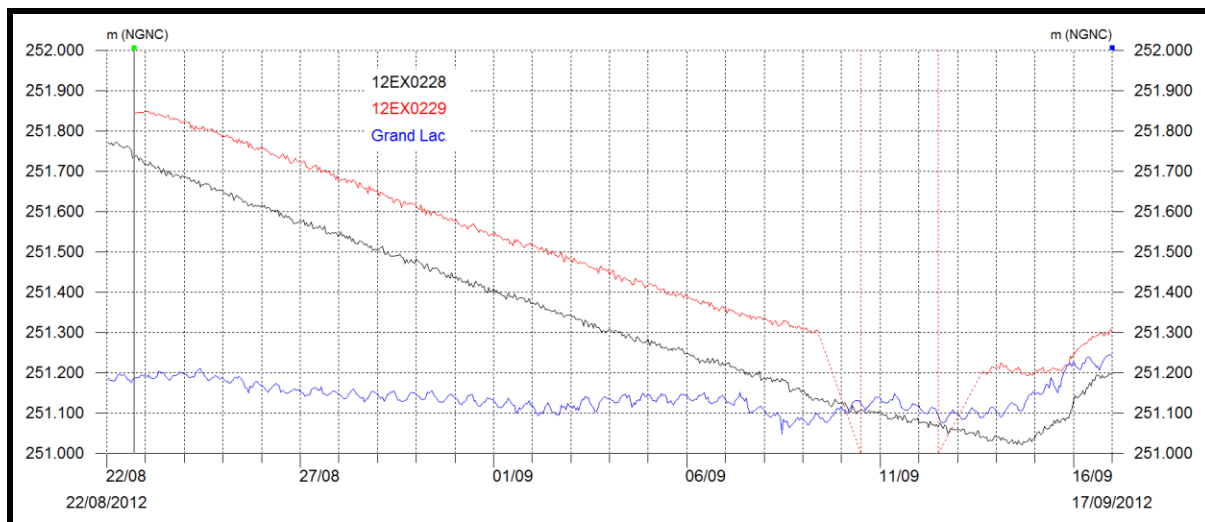


Figure 64: Secteur Grand Lac : Evolution comparée des niveaux piézométriques et du niveau du Grand lac durant l'étiage de septembre 2012

Afin de répondre à cette question, un essai par traçage a été lancé parallèlement à l'essai par pompage. Dès l'origine, l'objectif de cet essai n'était pas de déterminer s'il y avait connexion entre le Grand lac et KO4. Ce résultat direct paraissait très hasardeux à obtenir dans la mesure où les piézomètres localisés dans la partie amont du bassin de KO4 sont très éloignés, peu nombreux et pas nécessairement localisés dans la zone supposée de passage de la faille. C'est pour cette raison que très peu de points de suivi du traceur ont été sélectionnés dans KO4. Par acquis de conscience, 2 points de suivi ont tout de même été retenus. Dans la mesure où la dépression piézométrique localisée en pied de crête apparaissait comme un bon marqueur de l'existence d'une connexion vers KO4, la stratégie d'étude retenue a été de partir sur un essai par traçage sur une courte distance ceci afin d'augmenter les chances de succès. L'objectif de cet essai est par conséquent de déterminer si des écoulements souterrains sont possibles au travers de la limite de partage des eaux entre le Grand Lac et le pied de crête situé au sud.

L'injection de fluorescéine (1,5 Kg) a été effectuée sur les piézomètres 12EX0228 et 12EX0229 en avril 2013. La méthodologie de détection du traceur est basée sur l'utilisation de capteurs à charbon actif disposés dans 8 piézomètres et le forage utilisé lors de l'essai par pompage. Ce test n'a donné aucun résultat concluant.

En conclusion, il est considéré que :

- les observations piézométriques montrent qu'il existe une connexion entre la plaine des Lacs et KO4 via une faille d'extension régionale et d'orientation N140° qui passe au niveau du Grand Lac ;
- la zone de capture des eaux souterraines par cette faille fait environ 12 ha correspondant à une petite partie du flanc nord de la crête séparant la plaine des lacs du bassin KO4 ;

- les observations piézométriques suggèrent que ce bassin d'alimentation pourrait être plus étendu et intégrer tout ou partie du Grand lac ;
- quelle que soit l'extension de ce bassin d'alimentation, le débit capturé par la faille et déversé dans KO4 est faible au regard de la perméabilité mesurée au droit de la faille au cours de l'essai par pompage réalisé en avril 2013. Il est très probablement négligeable par rapport à l'alimentation du Grand Lac (environ 0.04 m³/s à l'étiage et 1.25 m³/s en moyenne annuelle selon A2EP, 2012d)

5.3.9.2 Connexion Plaine des lacs – KO4 : Axe de l'ancien aérodrome

A l'image de ce qui est observé au niveau du Grand Lac, les données piézométriques disponibles dans le secteur de l'aérodrome montrent l'existence de phénomènes saisonniers d'inversion des directions d'écoulement des eaux souterraines au droit d'une zone de passage d'une faille d'extension régionale et de direction N140°.

Au droit de cette faille, les eaux souterraines s'écoulent vers le sud en direction de la crête lors des périodes de basses eaux. Le reste du cycle hydrologique, les écoulements se dirigent vers le nord.

Sur cette base, on considère qu'il existe une connexion hydraulique entre la plaine des lacs et KO4 le long de cet axe. La perméabilité de cette voie de passage n'est pas connue. Elle est supposée du même ordre de grandeur que celle de l'axe Grand Lac-KO4.

5.3.10 Connexions interbassins hypothétiques

- ✂ Pièces graphiques – Carte D30 – Hypothèse de continuité hydraulique entre KO4 et Trou Bleu
- ✂ Pièces graphiques – Carte D24 – Localisation des bassins endoréiques et connexions interbassins

Ces connexions hypothétiques correspondent à des cas où les indices hydrologiques et géomorphologiques sont concordants mais où les données piézométriques ne permettent pas de décrire le comportement hydrodynamique de la zone concernée (données piézométriques absentes ou insuffisantes). Les connexions interbassins hypothétiques sont les suivantes :

- hypothèse de continuité hydraulique depuis le Grand lac jusqu'aux bassins de Port Boisé (et notamment Trou Bleu). La question de l'existence de cette continuité hydraulique reste posée (Carte D30). Dans le cadre de l'étude d'impact hydrogéologique présentée au volet C du livret C, il est fait l'hypothèse que cette continuité n'existe pas ;
- secteur de la Wajana. Les données LIDAR disponibles ont permis de détecter la présence d'un bassin endoréique d'environ 1 km² de superficie, accolé à la limite nord est du bassin de la Wajana. Les campagnes de jaugeages différentiels réalisées dans le secteur (A2EP, 2012b et 2014b) suggèrent que ce bassin endoréique se déverse dans la rivière Wajana ;
- secteur de l'Entonnoir. un petit bassin endoréique est situé en bordure sud-est du bassin endoréique de l'Entonnoir. Ce bassin fait 0,28 km². Lors de la réalisation des essais par traçage au niveau de l'Entonnoir (EMR, 2011), il avait été envisagé de tester également ce petit bassin versant. Un exutoire supposé (qui prenait la forme d'une petite source) avait été localisé dans le bassin endoréique de la mine des japonais. Ce test n'a pas pu avoir lieu en raison d'un tarissement rapide de cette source.

Un plan d'actions spécifiques est en cours de définition afin de vérifier l'existence ou non d'une continuité hydraulique depuis le Grand lac jusqu'aux bassins de Port Boisé. A échéance de 2 ans à 3 ans, il poursuit les 2 objectifs suivants :

- déterminer s'il existe une continuité hydraulique entre KO4 et le bassin endoréique de la Kwé Ouest ;
- définir les directions d'écoulement des eaux souterraines dans Port Boisé. L'objectif opérationnel de ce volet est de cartographier la limite de partage des eaux souterraines entre le bassin de la Kwé principale et celui de Trou Bleu.

5.3.11 Relations nappes-rivières

 Se référer aux cartes D31 à D38

 Se référer aux documents – Synthèse des observations piézométriques – Secteur de Goro (A2EP, 2012b) et Synthèse des observations piézométriques – Secteur de Goro : Analyses complémentaires pour la période 2011 à 2013 (A2EP, 2014b).

Les campagnes de jaugeages différentiels effectués dans le secteur de Goro ont fait l'objet d'une analyse spécifique réalisée en 2 temps (A2EP, 2012b puis A2EP, 2014b). Ces 2 rapports sont fournis dans le CD-ROM des données de référence.

Ces campagnes de jaugeage différentiel sont réalisées trois fois par an depuis 2011 sur les principaux cours d'eau de la zone d'étude. Chaque campagne consiste à effectuer des mesures de débit à différents endroits le long d'un cours d'eau. La durée de campagne doit être la plus courte possible pour chaque cours d'eau afin de se soustraire à de possibles variations de débit (crues ou périodes marquées de tarissement des rivières). Les mesures sont effectuées hors influence de crue afin d'approcher le débit de base des cours d'eau. Pour un cours d'eau donné la comparaison des débits mesurés de l'amont vers l'aval permet de définir le caractère infiltrant ou drainant de chaque tronçon de rivière.

Les périodes d'observations sont caractérisées en fonction du contexte pluviométrique et des niveaux piézométriques généraux. Les huit campagnes de jaugeage réalisées entre 2011 et 2013 ont été qualifiées de la manière suivante :

- très hautes eaux : du 13 au 22 février 2012 ;
- hautes eaux : juillet 2012 et juin 2013 ;
- moyennes eaux : novembre 2012 et octobre 2013 ;
- basses eaux : juillet 2011 et février 2013 ;
- très basses eaux : novembre 2011 (plus bas niveaux mesurés sur la période d'observation).

Il est important de noter que selon les années hydrologiques, la période d'étiage est susceptible de se prolonger au-delà des saisons habituellement constatées, ce qui fait par exemple que le mois de février 2013 correspond à des basses eaux, alors que février 2012 est la période de plus hautes eaux constatée sur la période d'observation.

Toutes ces campagnes permettent de couvrir une grande variété de conditions hydrologiques rencontrées durant la période d'observation. Les résultats obtenus sont les suivants (Cartes D31 à D38 et Tableau 44) :

- globalement, à l'échelle des bassins versants, l'ensemble des rivières de la zone d'étude draine les nappes, notamment l'unité saprolitique et le bedrock fissuré altéré sous-jacent ;
- néanmoins, à l'échelle des tronçons de rivière, la relation nappe-rivière n'est pas univoque. Pour une même rivière, selon la situation hydrologique et le tronçon considéré, des zones de perte de débit ou d'apport peuvent être observées.

Tableau 44 : Synthèse des observations sur les interactions entre les rivières et la nappe principale

Rivière	Interaction(s) dominante(s)	Plage de débit l/s	Type d'évolution pendant le cycle hydrologique	Commentaires
Kué Binyi	Drainant	189 - 2000	Inversion	Inversion des interactions entre l'amont et l'aval au niveau de la zone de rupture de pente
Kwé Nord	Drainant / neutre	198 - 407	Assez importante et progressive	La partie amont est principalement drainante
KN1	Drainant	43 - 169	Très Peu	Quelques tronçons deviennent infiltrants
Kwé Ouest	Drainant	267 - 685	Peu	L'évolution des interactions est plus importante dans la partie amont
KO5	Drainant	112 - 192	Aucune	Présence d'une source importante en amont de la confluence avec Kwé Ouest
Kwé Est	Drainant	8 - 92	Lente et progressive	Les interactions évoluent progressivement de l'amont vers l'aval
Creek de la Crête Sud	Drainant	9 - 72	Très peu	La rivière draine la nappe sur la totalité de son parcours
Wajana	Drainant	30 - 365	Très peu	
Cascade	Drainant/ Infiltrant	11 - 48	Aucune	Alternance de tronçons drainants et infiltrants
Truu	Drainant	64 - 301	Modérée	Caractère drainant apparent sur l'amont lié à la présence de sources.
Kadji 1	Drainant / Infiltrant	156 - 369	Importante	Biais à cause d'une répartition non uniforme des stations de jaugeage
Kadji 2	Drainant	102 - 239	Modérée	Diminution progressive des tronçons drainants et infiltrants au profit des tronçons neutres

5.3.12 Relations nappes-lacs-dolines

☞ Se référer aux documents – Synthèse des observations piézométriques – Secteur de Goro (A2EP, 2012b) et Synthèse des observations piézométriques – Secteur de Goro : Analyses complémentaires pour la période 2011 à 2013 (A2EP, 2014b).

Les mesures piézométriques et limnimétriques effectuées dans le secteur de Goro ont fait l'objet d'une analyse spécifique réalisée en 2 temps (A2EP, 2012b, puis A2EP, 2014b). Les 2 rapports sont fournis dans le CD-ROM des études de référence.

Les lacs sont présents dans de nombreuses parties du paysage et peuvent présenter différents types d'interactions avec les eaux souterraines.

L'analyse des interactions entre les lacs et les différents compartiments hydrogéologiques s'appuie sur des esquisses piézométriques détaillées construites à partir des observations piézométriques disponibles en périphérie des lacs et des données bathymétriques (CAPSE, 2011). Ces cartes ont été établies à partir de données acquises en dehors des périodes pluvieuses, afin d'éviter d'éventuels biais liés par exemple à des modifications rapides du niveau des lacs induites par le ruissellement de surface généré par les précipitations.

L'objectif de l'analyse est de déterminer précisément le sens et la direction des écoulements mis en jeu dans les interactions entre la nappe et les lacs. Cette analyse a porté sur :

- le lac Robert ;
- le lac Xéré Wapo ;
- le Grand Lac ;
- le lac Goro Sud ;

Les résultats obtenus sont les suivants:

- existence d'une connexion hydraulique entre les nappes et les lacs Goro Sud et Xere Wapo. Cette relation apparaît complexe avec des inversions de gradient hydraulique selon le contexte hydrologique. Pour Goro Sud et Xere Wapo, les nappes alimentent ces lacs en situation de hautes et moyennes eaux. En basses eaux, une déconnexion ou une inversion des échanges est observée ;
- pour le lac Robert, les observations suggèrent l'existence d'une déconnexion permanente avec la nappe des latérites ou d'une alimentation permanente de la nappe par des infiltrations sous le lac ;
- le Grand Lac est alimenté continuellement par les eaux souterraines. Le débit d'alimentation d'origine souterraine est évalué à 38 l/s à l'étiage et à 360 l/s en moyenne annuelle (A2EP, 2012d).

5.3.13 Qualité des eaux souterraines

 *Se référer aux documents – Synthèse de la Qualité des eaux souterraines et superficielles – Secteur de Goro (A2EP, 2012a) et Synthèse approfondie de la Qualité des eaux souterraines et superficielles – Secteur de Goro (A2EP, 2014a)*

Ce volet constitue la synthèse de 2 rapports techniques (A2EP, 2012a et 2014a) fournis sur le CD-ROM des études de référence. Les données étudiées correspondent à un total de 287 échantillons d'eau souterraine, prélevés à partir de 119 piézomètres répartis dans les trois grands secteurs de Goro :

- 199 échantillons dans le secteur FM25,
- 33 échantillons dans le secteur SMLT,
- 55 échantillons dans le secteur KO4.

Tous les échantillons étudiés (eau de surface comprise) ont été prélevés durant quatre campagnes (n = nombre d'échantillons) :

- du 8 juillet au 1er septembre 2011 en période de « moyennes eaux » (n = 90) ;
- du 25 octobre au 20 décembre 2011 en période de « basses eaux » (n = 88) ;
- du 13 février au 9 mars 2012 en période de « hautes eaux » (n = 76) ;
- du 26 juin au 6 août 2012 en période de « hautes eaux » (n = 100).

Le Tableau 45 synthétise l'ensemble des analyses chimiques réalisées sous forme de statistiques descriptives.

Tableau 45 : Statistiques descriptives des résultats d'analyses chimiques obtenus pour les eaux souterraines (A2EP, 2014a)

Paramètre	LQ (mg/L)	Eau souterraine de la latérite (n = 131)				Eau souterraine de l'ensemble saprolite/péridotite (n = 167)			
		% de détection	Médiane (mg/L)	± étendue interquartile (mg/L)	Min-Max (mg/L)	% de détection	Médiane (mg/L)	± étendue interquartile (mg/L)	Min-Max (mg/L)
Aluminium dissous	0,01	68	0,09	0,07	< 0,01 – 0,31	72	0,09	0,07	< 0,01 – 1,68
Ammonium dissous*	0,025	39	0,013	0,019	< 0,025 – 1,67	43	0,013	0,032	< 0,025 – 1,607
Calcium dissous	0,25	99	1,72	1,03	< 0,25 – 31,18	96	1,49	0,78	< 0,25 – 20,58
Carbonates	3	2	1,5	0	< 3 - 66	3	1,5	0	< 3 - 60
Chlorures dissous	0,125	100	9,990	1,415	2,89 – 23,55	100	9,220	0,620	1,0 – 16,31
Chrome dissous**	0,001	85	0,009	0,010	< 0,001 – 0,174	85	0,010	0,011	< 0,001 – 0,437
Chrome VI**	0,02	47	0,01	0,01	< 0,02 – 0,18	37	0,01	0,01	< 0,02 – 0,31
Fer dissous*	0,01	61	0,03	0,03	< 0,01 – 0,481	71	0,05	0,03	< 0,01 – 1,28
Fluorures dissous*	0,1	3	0,05	0,0	< 0,1 – 0,36	3	0,05	0,0	< 0,1 – 0,27
Hydrogène carbonates	6	98	18	9	< 6 – 109,8	100	67	15	< 6 - 165
Hydroxydes	2	1	1	0	< 1 - 10	0	-	-	-
Magnésium dissous	0,1	100	1,7	1,3	0,5 – 29,2	100	12,5	2,9	< 0,1 – 48,1
Manganèse dissous*	0,001	90	0,025	0,028	< 0,001 – 2,125	77	0,010	0,018	< 0,001 – 0,404
Nitrates dissous*	0,5	44	0,25	0,4	< 0,5 – 7,2	29	0,25	0,2	< 0,5 – 2,8
Nitrites dissous*	0,05	15	0,025	0,00	< 0,05 – 0,18	11	0,025	0,00	< 0,05 – 0,18
Phosphates dissous*	0,5	0	-	-	-	1	0,25	0,0	< 0,5 – 2,0
Potassium dissous	0,1	98	0,5	0,5	0,1 – 5,6	90	0,3	0,1	< 0,1 – 15,3
Silice dissous	1	73	2	2	< 1 - 30	98	16	4	< 1 - 40

Paramètre	LQ (mg/L)	Eau souterraine de la latérite (n = 131)				Eau souterraine de l'ensemble saprolite/péridotite (n = 167)			
		% de détection	Médiane (mg/L)	± étendue interquartile (mg/L)	Min-Max (mg/L)	% de détection	Médiane (mg/L)	± étendue interquartile (mg/L)	Min-Max (mg/L)
Sodium dissous	0,1	100	6,6	0,9	4,6 – 31,0	100	6,3	0,7	4,4 – 38,7
Sulfates dissous	1,25	85	2,70	2,18	< 1,25 – 63,5	87	2,36	1,05	< 1,25 – 113,5
Conductivité	-	-	67,0	24,8	11,5 – 918,0	-	135,3	30,7	41,0 – 604,0
pH	-	-	5,59	0,67	3,60 – 11,76	-	7,83	0,63	4,10 – 10,30

LQ = limite de quantification de la méthode

* Paramètre indésirable

** Paramètre concernant une substance toxique

n = nombre d'échantillons

5.3.13.1 Fond géochimique tous secteurs confondus

La méthode du 90e centile a été utilisée pour établir les fonds géochimiques des eaux souterraines (BRGM 2007 et BRGM 2008).

Globalement, cette analyse montre que (Figure 65) :

- les eaux de la latérite sont à dominance chlorurées sodiques ou sulfatées sodiques. Les autres faciès hydrogéochimiques secondaires rencontrés sont le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, le faciès carbonaté sodique et le faciès bicarbonaté calcique et magnésien ;
- les eaux de l'ensemble saprolite-péridotite sont principalement bicarbonatées calciques et magnésiennes. Les faciès chlorurés sulfatés et chlorurés sodiques sont secondaires. Le fond géochimique des eaux de surface sur le secteur de Goro est comparable à celui de l'ensemble saprolitique-péridotite ;
- les eaux associées à la péridotite sont homogènes, bicarbonatées calciques et magnésiennes. Elles sont comparables à l'ensemble saprolite-péridotite ;
- le calcium, potassium, manganèse et sulfates dissous présentent des teneurs supérieures dans la latérite et tendent à diminuer avec la profondeur ;
- les teneurs en magnésium et silice dissous, ainsi que les teneurs en hydrogénocarbonates augmentent avec la profondeur. Elles sont plus élevées pour l'unité saprolite-péridotite fissurée que pour celles de la latérite et des eaux de surface.

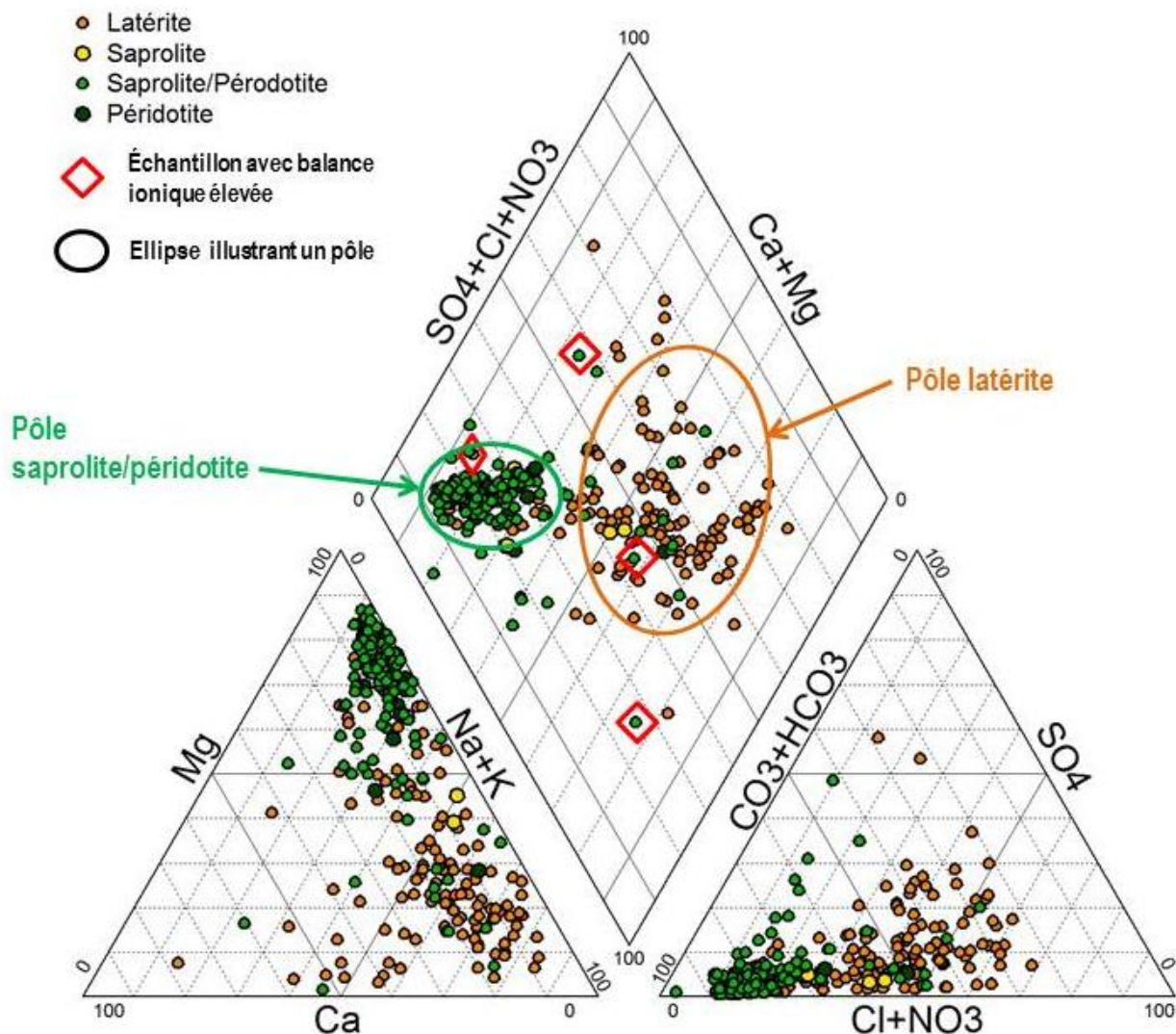


Figure 65: Projection des signatures chimiques des eaux souterraines dans le diagramme de Piper en fonction de l'hydrostratigraphie (A2EP, 2014a)

5.3.13.2 Fond géochimique par unité hydrostratigraphique

La synthèse des résultats obtenus est présentée au Tableau 46.

UNITE DES LATERITES

Pour les eaux latéritiques, les principaux éléments, ordonnés par abondance décroissante et par secteur en considérant les valeurs médianes, sont les suivants :

- FM25: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Si(OH)}_4 > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+}$
- SMLT: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Si(OH)}_4 > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$
- KO4: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Si(OH)}_4 > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Cr}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$

Les autres éléments sont présents à des concentrations faibles, proches ou inférieures aux limites de détection de la méthode (LDM).

Les eaux latéritiques du secteur FM25 montrent un faciès hydrogéochimique très variable, en majorité chloruré sodique ou sulfaté sodique avec une tendance carbonatée sodique. La grande superficie du secteur ainsi que l'importante variabilité des contextes hydrogéologiques rencontrés (plaine des lacs, plateaux, bassins endoréiques etc.) pourraient expliquer ce phénomène.

Pour le secteur KO4, le faciès hydrogéochimique des eaux dans la latérite apparaît plus homogène que celui du secteur FM25. Les eaux sont majoritairement bicarbonatées calciques et magnésiennes avec une tendance chlorurée sodique et sulfatée.

Pour le secteur SMLT, le faciès dominant des eaux latéritiques est chloruré sodique ou bicarbonaté calcique et magnésien.

Les différences chimiques entre secteurs sont les suivantes :

- le secteur SMLT se distingue avec des concentrations en hydrogénocarbonates, en silice et en magnésium dissous plus élevées ;
- les concentrations en chrome dissous et en chrome VI sont plus importantes dans le secteur KO4 comparativement aux deux autres secteurs. Ces concentrations pourraient s'expliquer par l'altération de chromites résiduelles piégées dans la cuirasse latéritique ou la latérite sédimentaire.

Tableau 46 : Fond géochimique par unité hydrostratigraphique (A2EP, 2014a)

Paramètre	statistiques Géologie			Eau de surface (mg/L)	Critère de qualité de l'eau (mg/L)
	Latérite (mg/L)	Saprolite / Péridotite (mg/L)	Péridotite (mg/L)		
	n = 131	n = 167	n = 20	n = 50	
Aluminium dissous	0,16	0,16	0,12	0,08	-
Ammonium dissous*	0,178	0,216	0,064	<0,01	2
Calcium dissous	6,95	4,96	5,8	1,1	-
Carbonates	<3	<3	<3	0,1	-
Chlorures dissous	15,1	10,3	12,9	12,4	200
Chrome dissous**	0,049	0,047	0,036	0,018	0,05
Chrome VI**	0,05	0,06	0,04	<0,01	0,05
Fer dissous*	0,09	0,14	0,07	0,12	1
Fluorures dissous*	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,7/1
Hydrogénocarbonates	60	104	109	51	-
Hydroxydes	<2	<2	<2	<2	-
Magnésium dissous	10,0	19,7	16,5	11,2	-
Manganèse dissous*	0,134	0,137	0,018	0,016	1
Nitrates dissous*	1,8	0,9	1,1	<0,5	50
Nitrites dissous*	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
Phosphates dissous*	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,7
Potassium dissous	2,0	1,3	0,6	0,2	-
Silice dissous	13	22	26	7	-
Sodium dissous	9,9	9,3	9,2	7,1	-
Sulfates dissous	12,00	7,12	5,98	5,02	150

* Paramètre indésirable

** Substance toxique

Note : Le critère de qualité de l'eau indiqué pour le chrome dissous et le chrome VI est celui de l'Annexe III et est pour le chrome total.

n= nombre d'échantillons analysés

UNITE DES SAPROLITES-PERIDOTITES FISSUREES

Quel que soit le secteur considéré les eaux de l'unité saprolite-péridotite fissurée appartiennent à la famille bicarbonatée calcique et magnésienne. Néanmoins, des différences apparaissent par secteur lorsqu'on examine l'abondance relative des éléments chimiques. Les principaux éléments, ordonnés par abondance décroissante et par secteur en considérant les valeurs médianes sont les suivants :

- FM25: $\text{HCO}_3^- > \text{Si (OH)}_4 > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+}$
- SMLT: $\text{HCO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Si (OH)}_4 > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{CO}_3^{2-} > \text{Fe}^{3+} > \text{F}^- > \text{Al}^{3+}$
- KO4: $\text{HCO}_3^- > \text{Si (OH)}_4 > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cr}^{3+}$

Les autres éléments sont présents à des concentrations faibles proches ou inférieures aux LDM. Sur cette base, les différences chimiques entre secteurs sont les suivantes :

- les eaux des secteurs FM25 et KO4 apparaissent plus riches en silice et en magnésium (constituants essentiels des roches ultrabasiques) que celles du secteur SMLT, même si globalement les concentrations en silices et en magnésium sont élevées dans toutes les eaux de l'ensemble saprolite-péridotite ;
- les eaux du secteur KO4 se distinguent par des concentrations plus élevées en chrome, tout comme les eaux de la latérite de ce secteur.

BILAN DE L'ANALYSE

Les résultats des analyses d'eau montrent que le principal facteur qui influence les caractéristiques géochimiques de l'eau souterraine, de l'eau de surface et de l'eau de résurgence dans les secteurs étudiés est la géologie.

Ainsi, il existe une nette différence entre les eaux prélevées dans la latérite et celles prélevées dans la saprolite, saprolite-péridotite et dans la péridotite.

Dans la latérite, les eaux présentent de plus faibles concentrations en silice et en magnésium dissous ainsi qu'en hydrogénocarbonates (bicarbonates), par rapport à celles de l'ensemble saprolite-péridotite. Il est généralement reconnu que lors de l'altération latéritique, silice et magnésium sont rapidement libérés par l'altération des minéraux ferromagnésiens comme l'olivine et la serpentine. Comme le milieu est généralement confiné et mal drainé à la base des profils latéritiques, les éléments s'accumulent dans la saprolite et la péridotite (silice, magnésium, nickel, etc.). Plus haut dans la latérite où le drainage est plus important, ces éléments sont plutôt lessivés et s'accumulent vers le bas des profils latéritiques ou dans les zones basses en aval. C'est ce qui pourrait expliquer les concentrations plus élevées en silice et en magnésium dans les eaux de la saprolite, de la péridotite ainsi que des eaux de surface. D'ailleurs, l'influence de la géologie sur les variations spatiales a également été observée par Trescases (1975) dans ses travaux sur l'altération latéritique des roches ultrabasiques de la Nouvelle-Calédonie et par Roche lors de l'étude d'impact environnemental et social (EIES) du Projet Koniambo (2005).

La composition minéralogique de la roche mère influence également la composition chimique des eaux. A cet égard, dans le secteur KO4, on note que les concentrations en chrome dissous et en chrome VI sont plus élevées que dans les autres secteurs.

L'influence marine se manifeste principalement par la présence, dans l'eau, d'ions chlorures, fluorures et sodium (eaux à faciès hydrochimique chloruré et sodique). Ces éléments, en particulier

le chlore, ne sont pas apportés par la roche mère ultrabasique, ils semblent donc apportés par l'eau de pluie (Trescases, 1975).

5.3.13.3 Comparaison des analyses chimiques et des fonds géochimiques avec des critères de qualité

Cette comparaison a été effectuée en prenant comme référence les limites de qualité des eaux douces superficielles utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux de source conditionnées (Annexe III de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique), fixées pour l'application des dispositions des articles R. 1321-38 à R. 1321-41 du code de la santé publique.

En faisant une distinction par contexte géologique, la comparaison a porté sur :

- les analyses chimiques de l'ensemble des prélèvements ;
- le fond géochimique défini sur la base des prélèvements.

L'objectif est de montrer que dans certains secteurs du bassin de la Kwé, les eaux souterraines présentent des teneurs naturelles en éléments chimiques qui dépassent les seuils fixés à l'annexe III de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. Ces dépassements sont liés au fond géochimique naturel des eaux. Les résultats obtenus sont les suivants (Tableau 47) :

- tous secteurs et géologies confondus, les critères de qualité en chrome dissous et en chrome VI sont respectivement dépassés pour 7 et 8 % des échantillons ;
- les dépassements du chrome touchent principalement le bassin KO4 alors que ce dernier est peu anthropisé. Ils représentent 14% des échantillons pour la latérite et entre 18 et 32 % pour l'unité saprolite-péridotite fissurée. Il convient de noter que la limite de qualité de l'annexe III concerne le chrome total (fraction solide et dissoute), ce qui signifie que les dépassements constatés sont probablement sous-estimés puisque les analyses chimiques ont porté sur la fraction dissoute uniquement. Ces dépassements touchent également le secteur FM25 (5 à 8 % des échantillons) et le secteur SMLT (8% des échantillons prélevés dans l'aquitard latéritique) ;
- 10 % des prélèvements réalisés dans les latérites du bassin KO4 dépassent la valeur limite en manganèse ;
- enfin, pour le secteur SMLT, 10 % des prélèvements présentent des teneurs en fer dissous supérieures au critère de qualité.

Tableau 47 : Pourcentage de dépassement du critère en fonction des différents secteurs et de ses formations géologiques associées (A2EP, 2014a)

Géologie		Pourcentage de dépassement du critère				
		Chrome dissous	Chrome VI	Fer dissous	Manganèse dissous	Phosphate dissous
Tous secteurs et géologie confondus (n = 354)		7%	8%	1%	1%	1%
FM25	Latérite (n = 90)	8%	6%	0%	0%	0%
	Saprolite/Péridotite (n = 95)	5%	8%	1%	0%	2%
	Péridotite (n=14)	0%	0%	0%	0%	0%
KO4	Latérite (n = 29)	14%	14%	0%	10%	0%
	Saprolite/Péridotite (n = 25)	18%	32%	0%	0%	0%
SMLT	Latérite (n = 12)	8%	0%	0%	0%	0%
	Saprolite/Péridotite (n = 21)	0%	0%	10%	0%	0%

5.3.14 Usage

Il n'y a pas d'usage recensé de la ressource en eaux souterraines pour le projet minier de VNC.