



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering



Institut de recherche
pour le développement



Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne

**Formation Post-Universitaire: Eau pour l'Agriculture et l'Approvisionnement
des Communautés (EAC)**

**Option: Mobilisation des Eaux Souterraines et Approvisionnement des Communautés
(MESAC)**

Mémoire de stage pour l'obtention du DESS

Sujet

**CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES
ECOULEMENTS DE SURFACE SUR LE BASSIN
VERSANT DE LA DONGA (Rép. Bénin)**

Par

Yao Y. Joël TOSSOU

Sous la Supervision de

Dr Luc SEGUIS

(Chargé de recherche à l'IRD-Bénin)

Mars 2007

RESUME

Cette étude porte sur la caractérisation géochimique des écoulements de surface sur le bassin versant de la Donga (586 km²), au Bénin. Elle a été réalisée dans le cadre du Projet International AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) dont l'un des objectifs est d'identifier et d'analyser les processus physiques de surface entrant dans le mécanisme de la Mousson Ouest Africaine.

Les résultats de ces travaux montrent que les écoulements de surface sont peu minéralisés (conductivité électrique de l'ordre de 100-130 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sur l'ensemble du bassin de la Donga, cette minéralisation étant plus prononcée pendant les écoulements de base. Les eaux sont pour la plupart du temps de faciès bicarbonatée calcique.

Une décomposition hydrochimique de l'hydrogramme des crues en deux composantes (ruissellement rapide sur surface saturée et flux de subsurface) de la saison 2006 sur la base de deux traceurs à savoir la conductivité électrique (CE) et le bicarbonate a révélé une contribution prépondérante des eaux de subsurface aux écoulements de surface.

Mots Clés: Bénin, Bassin versant de la Donga, Géochimie, Conductivité électrique, Eléments majeurs, Déconvolution de l'hydrogramme des crues.

ABSTRACT

This study is about the geochemical characterization of the surface flows on the Donga catchment in Benin. The study has been undertaken within the framework of the International Project AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis), which one of goals is to identify and analyse the physical process of the surface, which contribute in West African monsoon mechanism.

The results show that the surface flows are bit mineralized (conductivity is under 100-130 $\mu\text{S}/\text{cm}$) on the whole Donga catchment, but the mineralization is more important during the base flows. The water has most of the time calcic bicarbonated facies.

An hydrochemical separation of a set of floods in 2006 rainy season in two components (effective runoff and subsurface flow) based on two indicators such as conductivity and bicarbonate, has shown an important contribution of the subsurface water in the surface flow.

Keywords: Benin, Donga catchment, geochemistry, electric conductivity, hydrogram separation.

TABLE DES MATIERES

RESUME	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
REMERCIEMENTS	ix
Introduction générale	1
I. Contexte général	1
II. Problématique	1
III. Présentation du projet AMMA et des unités hydrologiques de l'étude	2
III.1 Présentation du projet AMMA	2
III.2 Unités hydrologiques de l'étude.....	4
IV. Objectif et démarche	4
PREMIERE PARTIE: MILIEU D'ETUDE	
I. Brève présentation du Bénin	6
II. Présentation de la zone d'étude	6
II.1 Situation géographique	6
I.2 Pluviométrie	7
II.3 Evapotranspiration.....	7
II.4 Relief, hydrographie et végétation.....	7
II.5 Géologie.....	9
II.6 Pédologie	10
II.7 Hydrogéologie	11
II.8 Etat du réseau pluviographique	11
II.9 Minéralisation des eaux superficielles en milieux cristallins	12
DEUXIEME PARTIE: ETUDE DES ECOULEMENTS DE LA CAMPAGNE 2005	
I. Méthodologie	13

I.1 Matériels	13
I.1.1 Réseau hydrométrique.....	13
I.1.2 Dispositif de mesures hydrométriques	15
I.1.3 Dispositifs de prélèvement des échantillons pour les analyses hydrochimiques	15
II. Mesures et analyses	15
II.1 Acquisition des données	15
II.1.1 Données hydrométriques	15
II.1.2 Données hydrochimiques	16
II.2 Critique des données hydrochimiques	17
III. Résultats	19
III.1 Débits instantanés.....	19
III.2 Ecoulements de base	20
III.3 Evolution temporelle de la conductivité aux différentes stations	24
III.4 Evolution temporelle des éléments majeurs dans les écoulements	26
III.4.1 Les cations.....	26
III.4.2 Les anions.....	28
III.4.3 Evolution temporelle du silicium (Si) à Donga-Pont	31
III.5 Faciès des eaux.....	31
III.6 Etude des écoulements de base	32
III.6.1 Variation de la conductivité dans les débits de base aux trois stations	32
III.6.2 Teneurs des majeurs en fonction des débits de base aux trois stations.	34
III.6.3 Le silicium dans les écoulements de base à Donga pont.....	36
III.6.4 Faciès des eaux pour les écoulements de base	38
 TROISIEME PARTIE: ETUDE DES ECOULEMENTS DE LA CAMPAGNE 2006	
I. Protocole d'échantillonnage.....	39
II. Présentation des résultats.....	40
II.1. Evolution temporelle du débit et de la conductivité pendant les crues.....	40
II.1.1 Evolution du débit	40
II.1.2 Critique des données de conductivité électrique (CE).....	42
II.2 Décomposition des crues	45
II.2.1 Approche méthodologique et traceurs utilisés.....	45
II.2.2 Résultats obtenus	47

CONCLUSION	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52
ANNEXES	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre du programme AMMA. (en haut) et Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO) (en bas) (Kamagaté, 2006)	3
Figure 2: Bassin versant de la Donga (Kamagaté, 2006)	4
Figure 3: Topographie et réseau hydrographique (Kamagaté, 2005).....	8
Figure 4: Carte d'occupation du sol (Zin et <i>al.</i> , 2003).....	9
Figure 5: Carte géologique au 1/200 000e du bassin de la Donga (BRGM/OBM, 1984).	10
Figure 6: Réseau pluviographique et station météorologique (Kamagaté, 2006).....	12
Figure 7: stations hydrométriques du bassin de la Donga (Kamagaté 2006).....	14
Figure 8: Limnigraphe automatique (Type Thalimèdes) et ses composantes.....	14
Figure 9: Débits instantanés aux différentes stations du bassin.....	19
Figure 10: Hydrogramme de l'année 2005 avec date de prélèvement (écoulement de base en point rouge et crue en point blanc) à Ara-Pont	21
Figure 11: Hydrogramme de l'année 2005 avec dates de prélèvement (écoulement de base en point rouge et crue en point blanc) à Donga-Kolo	22
Figure 12: Hydrogramme de l'année 2005 avec date de prélèvement (écoulement de base en point rouge et crue en point blanc) à Donga-Pont.....	23
Figure 13: Evolution temporelle de la conductivité aux différentes stations (Gros points = écoulement de base).	25
Figure 14: Teneur en Magnésium aux différentes stations.	26
Figure 15: Teneur en Potassium aux différentes stations.....	27
Figure 16: Teneur en Calcium aux différentes stations	27
Figure 17: Teneur en Sodium aux différentes stations.....	28

Figure 18: Teneur en Nitrates aux différentes stations	28
Figure 19: Teneur en sulfates aux différentes stations	29
Figure 20: Teneur en Bicarbonates aux différentes stations	29
Figure 21: Teneur en Chlore aux différentes stations	30
Figure 22: Evolution temporelle du silicium (Si) à Donga-Pont (Gros points = écoulements de base).....	31
Figure 23: Diagramme de Piper pour les écoulements superficielles aux différentes stations de la Donga (Toute saison).....	32
Figure 24: Evolution de la CE pendant les écoulements de base aux trois stations.....	33
Figure 25: Teneurs des éléments majeurs dans les écoulements de base (Donga pont)	35
Figure 26: Teneur en Si dans les écoulements de base (Donga pont).....	37
Figure 27: Silice en fonction des écoulements de base à Donga-Affon.....	37
Figure 28: Diagramme de Piper pour les écoulements de base aux trois stations hydrométriques de la Donga.....	38
Figure 29: Evolution temporelle du débit (mesuré et automatique) au cours des crues échantillonnés à la station hydrométrique de Donga-Kolo (hivernage 2006).....	41
Figure 30: Relation entre la conductivité électrique (CE) mesurée manuellement et la teneur en bicarbonate (HCO_3) (en 2005).....	42
Figure 31: Evolution temporelle de la CE (mesuré, automatique et déduite du HCO_3) au cours des crues échantillonnés à la station hydrométrique de Donga-Kolo (hivernage 2006)	43
Figure 32: Variation de la CE automatique en fonction de la CE mesurée manuellement pour les crues échantillonnées	45
Figure 33: Contribution de l'écoulement souterrain superficiel (flux de subsurface) aux écoulements pendant les crues (Hivernage 2006)	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des stations de mesures hydrométriques considérées.....	13
Tableau 2: Volumes annuels enregistrés à la station de Donga-Kolo	20
Tableau 3: Comparaison des concentrations moyennes (en méq/L) des éléments majeurs dans les écoulements de base : Période 2003-2004 puis 2005 (n désigne le nombre d'échantillons prélevés en écoulement de base).	36
Tableau 4: Valeurs caractéristiques des différents traceurs utilisées pour la décomposition des crues	47
Tableau 5: Contribution de l'écoulement de subsurface à l'écoulement superficiel	48

LISTE DES ANNEXES

Annexe1: Analyse chimiques des eaux échantillonnées pendant la campagne 2005 (Ecoulements de base en gras).	56
Annexes 2: Concentration de la silice à Donga-Pont en 2005 (écoulement de base en gras) .	59
Annexe 3: Crues échantillonnées en 2006 et conductivités correspondantes	60
Annexe 4: Liste des matériels utilisés pour l'échantillonnage de crue (2006)	62
Annexe 5: Mode opératoire pour la mesure du Titre Alcalimétrique Complet (TAC)	62

REMERCIEMENTS

-Mes amis m'ont accordé leur confiance et leur sympathie. Des uns et des autres, j'ai pu apprécier le dévouement, la spontanéité, la sincérité.

-Saurais-je rendre à chacun seulement une partie de tout ce que j'ai reçu ? Peut-être...

-Suis-je même assez certain de reconnaître chacun de ceux à qui je dois ? Assurément non.

C'est pourquoi, au risque de faire des omissions graves, je voudrais inviter les uns et les autres à accepter sous cette forme anonyme mon merci, modeste, certes, mais sincère. Je sais que certaines choses se disent mieux dans le silence.

Mais je voudrais faire une mention spéciale à :

-Luc SEGUIS, hydrologue, chargé de recherche à l'IRD-Bénin, mon encadreur qui a su diriger ce travail jusqu'à terme. La Clarté de ses suggestions et sa spontanéité dans la résolution des problèmes m'ont été très utiles.

- Tous les chercheurs et techniciens de l'IRD-Bénin qui ont participé à la collecte des données sur le terrain, aux dépouillements, aux traitements et aux analyses de laboratoire. Merci aussi pour le climat de fraternité vécu au cours de mes stages

-Mon père et à ma mère pour toutes leurs bénédictions sans lesquelles je ne pourrais évoluer dans ma vie.

-Ma soeur aînée Rosine pour son ambition de voir ses jeunes frères évoluer. Son soutien indéfectible m'a beaucoup réconforté et a été déterminant pour l'aboutissement de ma formation académique. Merci Rose.

-Tous mes jeunes frères et soeurs. Que ce travail soit un espoir pour eux.

-Tous les formateurs de 2IE (Ex Groupe EIER-ETSHER) sans qui cette spécialisation n'aurait été possible.

-Tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce rapport afin de parfaire sa qualité scientifique.

-Tous les adeptes de la Formation Post-Universitaire EAC (Promotion 2005-2006) pour les moments forts passés ensemble.

A tous, profondes gratitudee.

Introduction générale

I. Contexte général

Toutes les régions d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique Centrale sèches comme humides ont été touchées par une diminution de la pluviométrie annuelle autour des années 1970 (Servat *et al*, 1998). Elle est caractérisée par une diminution de l'ordre de 20% à 30 % de la pluviométrie (l'Hôte *et al.*, 2002 ; LEBEL et Vishel, 2005) et a engendré une importante diminution des débits (Mahé et Olivry, 1999). Cette sécheresse a parfois provoqué le tarissement de nombreux cours d'eau (comme le Niger) qui ont accusé une baisse importante de leurs écoulements. Au Centre du Bénin, cette réduction du nombre d'événements pluvieux se traduit par une diminution des débits bien plus importante (environ 35 %) sur l'Ouémé supérieur (Le Lay et Galle, 2005a).

Cette relation entre la pluie et le débit ainsi que sa variabilité spatio-temporelle, est encore mal comprise à l'échelle régionale. L'explication avancée est que la diminution relativement plus importante des débits trouve son origine dans la réduction durable des apports en eau souterraine (Kamagaté, 2006). Pour identifier, quantifier les processus entrant en jeu dans les différents termes du bilan hydrologique, le bassin de la Donga (586 km²) situé dans le cours supérieur du Haut Ouémé a été instrumenté.

II. Problématique

Dans les zones soudaniennes, contrairement aux zones sahéliennes caractérisées par des écoulements principalement hortonien (Peugeot, 1995) et des nappes relativement profondes (Favreau, 2000), les écoulements se caractérisent par une coexistence de ruissellement hortonien et d'écoulements de subsurface et souterrains sur surfaces saturées (Chevallier, 1990 ; Chevallier et Planchon, 1993). Les nappes y sont peu profondes à affleurantes et contribueraient aux écoulements. Les études actuellement menées dans le cadre du projet AMMA sur le bassin de la Donga ont révélé l'existence de deux nappes dont l'une superficielle (2 mètres environ de profondeur) et l'autre en profondeur (jusqu'à 20 mètres). La nappe superficielle contribuerait à l'écoulement des rivières. C'est ainsi dans ce contexte que se situe notre travail.

III. Présentation du projet AMMA et des unités hydrologiques de l'étude

III.1 Présentation du projet AMMA

Le programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) a été initié en vue d'étudier le fonctionnement de la Mousson ouest-africaine et ses composantes: la dynamique atmosphérique, le cycle de l'eau continental, la chimie atmosphérique et les conditions de surface sur l'océan et le continent. Il vise deux objectifs principaux:

- (1) Améliorer notre compréhension de la Mousson Africaine et de son influence sur l'environnement physique, chimique et de la biosphère aux échelles régionale et globale.
- (2) Produire les connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest et définir les stratégies de surveillance appropriées.

Pour atteindre ces buts, une approche multidisciplinaire de l'étude de la Mousson Africaine est nécessaire, ce qui implique une forte collaboration internationale. AMMA fait le lien entre les observations, l'analyse des données et la modélisation numérique sur une large gamme d'échelles d'espace et de temps. Le projet porte sur les thèmes scientifiques suivants: Dynamique de la mousson et interactions d'échelle, cycle continental de l'eau, aérosols, chimie atmosphérique, alimentation, ressources en eau et santé.

Les mécanismes de la mousson d'Afrique de l'Ouest font intervenir des processus à des échelles spatio-temporelles très variées, caractéristiques des couplages entre dynamique atmosphérique, cycle hydrologique et dynamique de la végétation. Aussi, le projet AMMA met-il en oeuvre une stratégie d'observation multi-échelle. Trois sites de méso-échelle (**figure1**) ayant reçu le label d'ORE (Observatoire de Recherche en Environnement) sous le nom ORE AMMA-CATCH et s'étendant de la zone soudanienne (haute vallée de l'Ouémé au Bénin) à la zone sub-désertique (Gourma au Mali) ont été instrumentés :

-Le haut bassin de l'Ouémé (14 000 km²), au Bénin, suivi depuis 1997, s'étendant sur un degré de longitude (9°N-10°N) et caractérisé par un climat soudanien avec une pluie moyenne annuelle dépassant 1000 mm.

-Le degré carré d'HAPEX-Sahel (the Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel), au Niger suivi depuis 1990, (10 000 km², 2°E-3°E ; 13°N-14°N) avec une pluie moyenne annuelle de 500 mm environ ;

-Le Gourma Malien (30 000 km², 15°N-17°N) sur lequel les premières études de végétation remontent à 1982. La pluviométrie annuelle est de 300 mm.

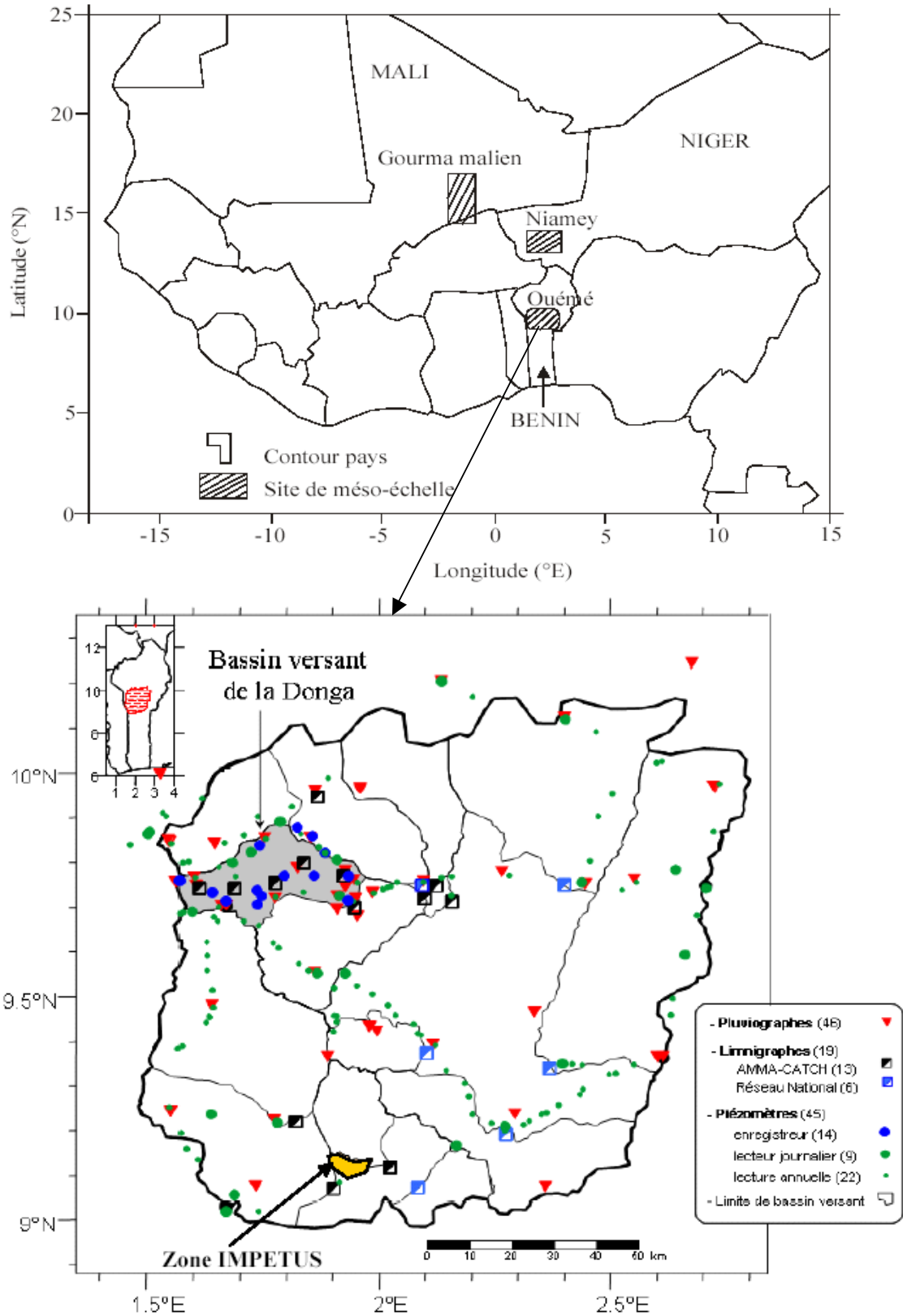


Figure 1: Sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre du programme AMMA. (en haut) et Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouéomé (OHHVO) (en bas) (Kamagaté, 2006)

III.2 Unités hydrologiques de l'étude

A l'intérieur des sites ci-dessus énumérés, des super-sites de quelques Km² sont équipées plus densément. Ces fenêtres d'échelle plus fines sont le support des études de processus (notamment concernant les flux à l'interface sol-atmosphère) et de fermeture du bilan hydrique. Sur le site béninois (zone soudanaise), c'est le bassin de la Donga (586 Km²) qui constitue ce super-site.

Le bassin de la Donga (**figure 2**), situé au nord ouest de l'Observatoire Hydro-météorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO) est formé d'un emboîtement de plusieurs sous-bassins dont ceux d'Ara (13 Km²) et de Donga-Kolo (105 Km²). Il bénéficie d'une instrumentation renforcée et d'un suivi hydro-météorologique régulier depuis 1998. Sa superficie (586 Km²) en fait un objet hydrologique intermédiaire entre les grands bassins régionaux et les bassins expérimentaux. Cette échelle rend possible une caractérisation des processus hydrologiques, tout en permettant, en terme de bilan, une intégration suffisamment représentative de leurs variations spatio-temporelles naturelles.

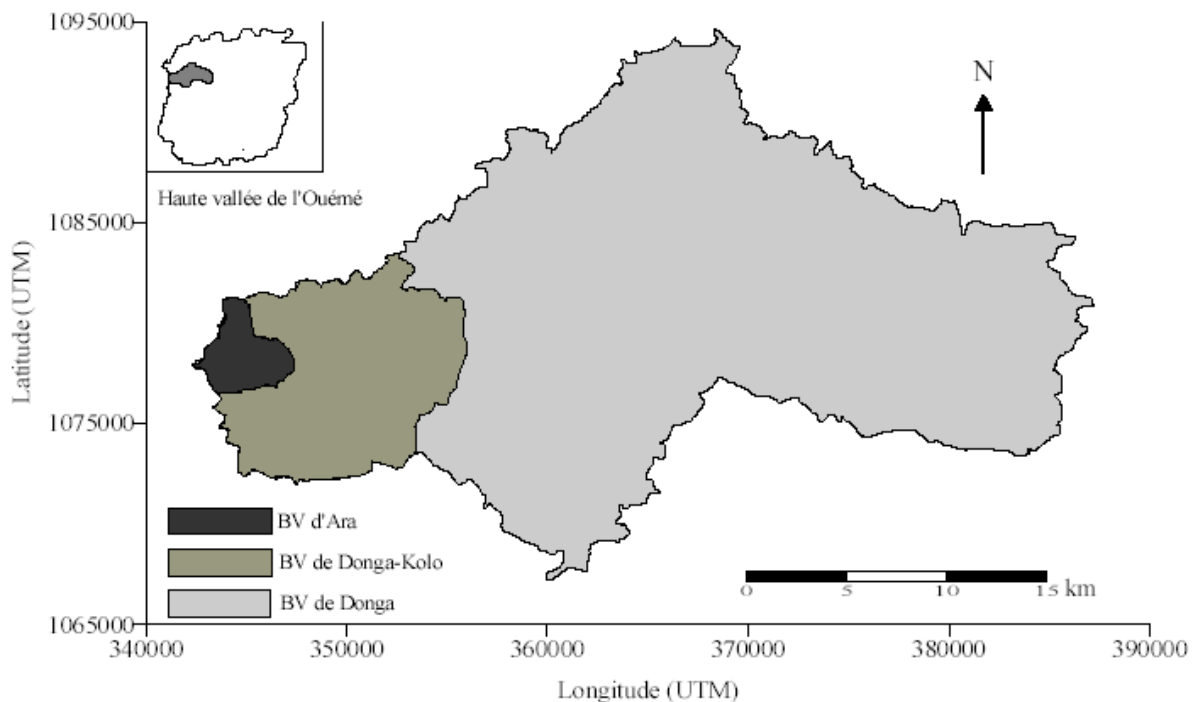


Figure 2: Bassin versant de la Donga (Kamagaté, 2006)

IV. Objectif et démarche

L'objectif de ce travail est de contribuer à la caractérisation de l'origine des écoulements sur le bassin de la Donga.

Notre étude se focalisera sur l'analyse des données hydrométriques et hydrochimiques des écoulements des campagnes des années 2005 et 2006. Il s'agira d'une part de faire la caractérisation géochimique des écoulements de l'hivernage 2005 et d'autre part de faire la décomposition des crues de la campagne 2006. Ces aspects ont été abordés en partie par Kamagaté (2006) au cours de sa thèse durant la période 2002 à 2004. Nous ferons alors dans ce rapport une comparaison de nos résultats avec ceux obtenus sur les années 2003 et 2004 afin de déduire les variations inter-annuelles enregistrées.

Nous avons bénéficié des données de la campagne 2005 qui étaient déjà collectées et dont la détermination des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs a été déjà faite. Nous n'avons participé qu'à la campagne de terrain de l'hivernage 2006 dont les échantillons sont toujours en cours d'analyse. Seules les données de hauteurs de pluie et les valeurs de conductivité de la station hydrométrique de Donga-Kolo sont actuellement disponibles pour ces échantillons.

PREMIERE PARTIE: MILIEU D'ETUDE

I. Brève présentation du Bénin

La République du Bénin est entièrement située dans la zone intertropicale de l'Afrique de l'Ouest, entre 6° 10' et 12° 25' de latitude Nord et 0° 45' et 3° 55' de longitude Est. Avec une superficie de 112 622 Km², le Bénin fait face au Sud à l'Océan Atlantique du Golfe de Guinée sur une largeur de 124 km et s'allonge du Sud au Nord sur une distance d'environ 700 km; sa largeur maximale qui s'étend entre les hautes montagnes de la partie septentrionale de la ville de Natitingou jusqu'au Borgou atteint 324 km. La République du Bénin est limitée au Nord-ouest par le Burkina-Faso, au Nord-est par le Niger, à l'Ouest par le Togo et à l'Est par le Nigeria.

Il peut être divisée en cinq régions naturelles :

- La région côtière, qui est une région sablonneuse bordée par des lagunes s'étendant de 2 à 5 km,
- Le plateau de "La Terre Barre", vers le centre, est composé de fer argileux et de marécages,
- Le plateau silico-argileux avec une savane herbeuse s'étendant du Nord d'Abomey jusqu'aux sommets de l'Atacora,
- Les régions montagneuses de l'Atacora avec une élévation d'environ 800 mètres d'altitude et constituant le réservoir d'eau du pays,
- Les plaines du Niger, qui représentent une vaste terre fertile et argileuse.

Le pays bénéficie d'un réseau hydrographique dense constitué de cours d'eau temporaires et permanents. Les principaux fleuves sont: l'Ouémé (400 Km dont 200 navigables), le Mono (350 Km dont 100 navigables) et le Couffo.

II. Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique

Situé dans le nord ouest du Bénin, à 450 Km de Cotonou, le bassin de la Donga se trouve entre les longitudes 1° 30' et 1°55' E et les latitudes 9°40' et 9°55' N (**Figure 2**). Ce bassin versant est un sous bassin de l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO). Il est administrativement présent dans le département de la Donga et a une superficie de 586 km².

I.2 Pluviométrie

Avec un cumul annuel de 1300 mm de pluie par an, le bassin de la Donga est situé dans une zone qualifiée par Aubreville de soudano-guinéenne (1000 à 1400 mm). Cette zone est régie par l'alternance d'une saison pluvieuse, d'avril à octobre et d'une saison sèche de novembre à mars (Varado, 2004). Il importe de signaler que peu de stations étaient disponibles avant 1997 pour l'estimation de la pluie moyenne sur le bassin versant, ce qui rend plus délicate l'analyse de la pluviométrie à l'échelle du bassin. La lame d'eau moyenne sur le bassin de la Donga n'a pu être déterminée qu'à partir de 1998.

II.3 Evapotranspiration

La monographie du Bénin (Le Barbé *et al.*, 1993) propose une valeur moyenne mensuelle calculée par l'équation classique de Penman à partir des données de Parakou (latitude : 09°N 21' et longitude : 2° E 36') collectées par l'ASECNA. Ces moyennes mensuelles varient de 3,0 mm.j⁻¹ en août à 5,9 mm.j⁻¹ en mars pour une moyenne annuelle d'environ 1600 mm. D'autres valeurs plus anciennes existent, mais elles portent cette fois sur les moyennes mensuelles d'évaporation « colorado sur bac » obtenues à partir uniquement de la température et de l'humidité relative à la station de Djougou. La moyenne annuelle déduite est estimée à 1800 mm et les valeurs mensuelles comprises entre 3 et 8 mm/j.

Les valeurs les plus récentes de l'ETP ont été estimées par Kamagaté en 2006 sur la station météorologique de Djougou à partir la méthode de la FAO (1998) dérivée de la formule de Penmann-Monteith. L'estimation a été faite sur les années de 2002 à 2004. L'évapotranspiration potentielle varie alors de 3 à 5 mm/j toutes années confondues avec deux pics centrés sur avril-mai et octobre. A l'échelle journalière, les valeurs varient entre 0,89 et 6,33 mm/j.

II.4 Relief, hydrographie et végétation

Le bassin de la Donga est développé sur la pénéplaine dahoméenne dont la pente générale orientée NO-SE présente une déclivité de l'ordre de 1,7 m/km. Les altitudes varient entre 480 m (à l'amont) et 330 m (à l'exutoire) et le bassin présente une topographie faiblement vallonnée.

Le réseau hydrographique en place correspond à la Donga et ses affluents qui drainent le bassin en direction du sud-est. Les rivières sont généralement d'ordre 2 ou 3. Le cours principal (Donga) a une longueur linéaire d'environ 75 km.

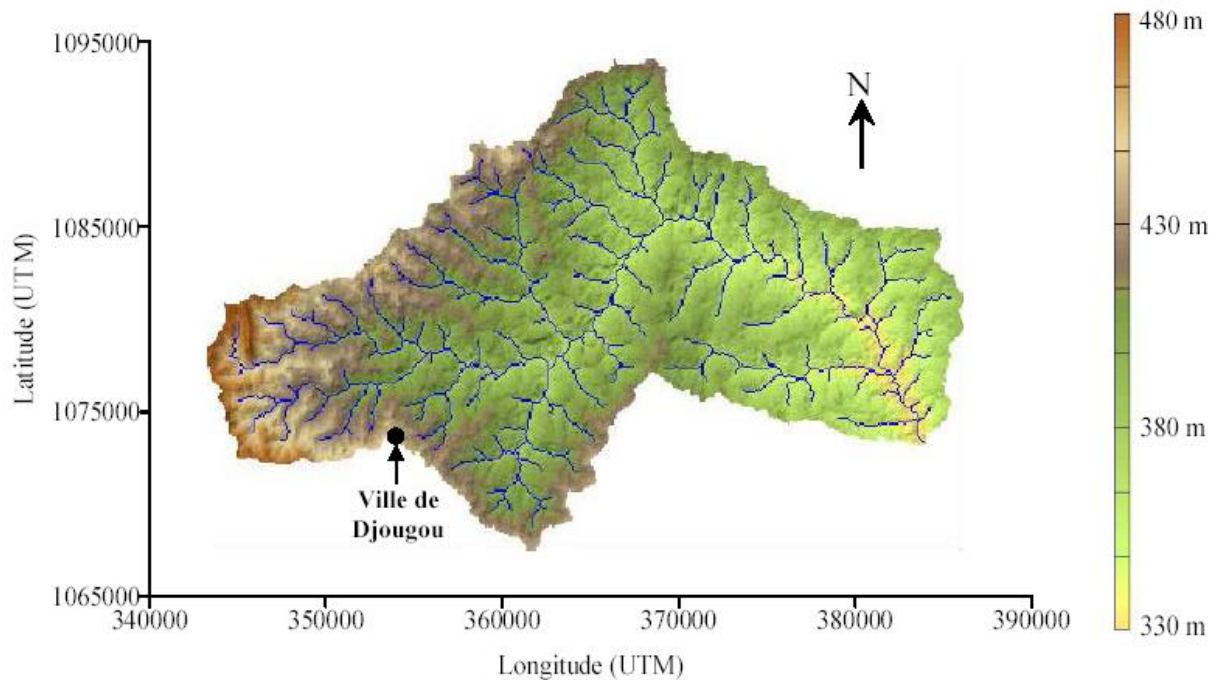


Figure 3: Topographie et réseau hydrographique (Kamagaté, 2005)

La totalité des rivières du bassin présentent un régime d’intermittence caractérisé par un assèchement total en saison sèche (entre novembre et avril) et une reprise des écoulements en saison humide (entre mai et octobre).

La végétation est majoritairement constituée de savane arborée plus ou moins dense, dominée par les espèces ligneuses telles que le Karité (*Vitellaria paradoxa*) et le néré (*Parkia biglobosa*) et des espèces herbacées (*Andropogon fastigiatus*, *Brachiaria sphacelat*, *pennisetum polystacion*) (Harris, 2004). La partie nord-ouest du bassin est occupée par la forêt classée de Béléfoungou et les principaux axes de drainage sont bordés d’une étroite forêt-galerie (*Elaeis guineensis*, *Berlinia grandifolia*, *Mimusop endongensis*). Cette végétation est aujourd’hui largement dégradée en une mosaïque de champs à vocation vivrière (mil, manioc, maïs, igname) ou de rente (coton, anacarde). Il apparaît également que le développement du couvert végétal, notamment les herbacés, suit étroitement la pluviométrie et l’humidification du sol.

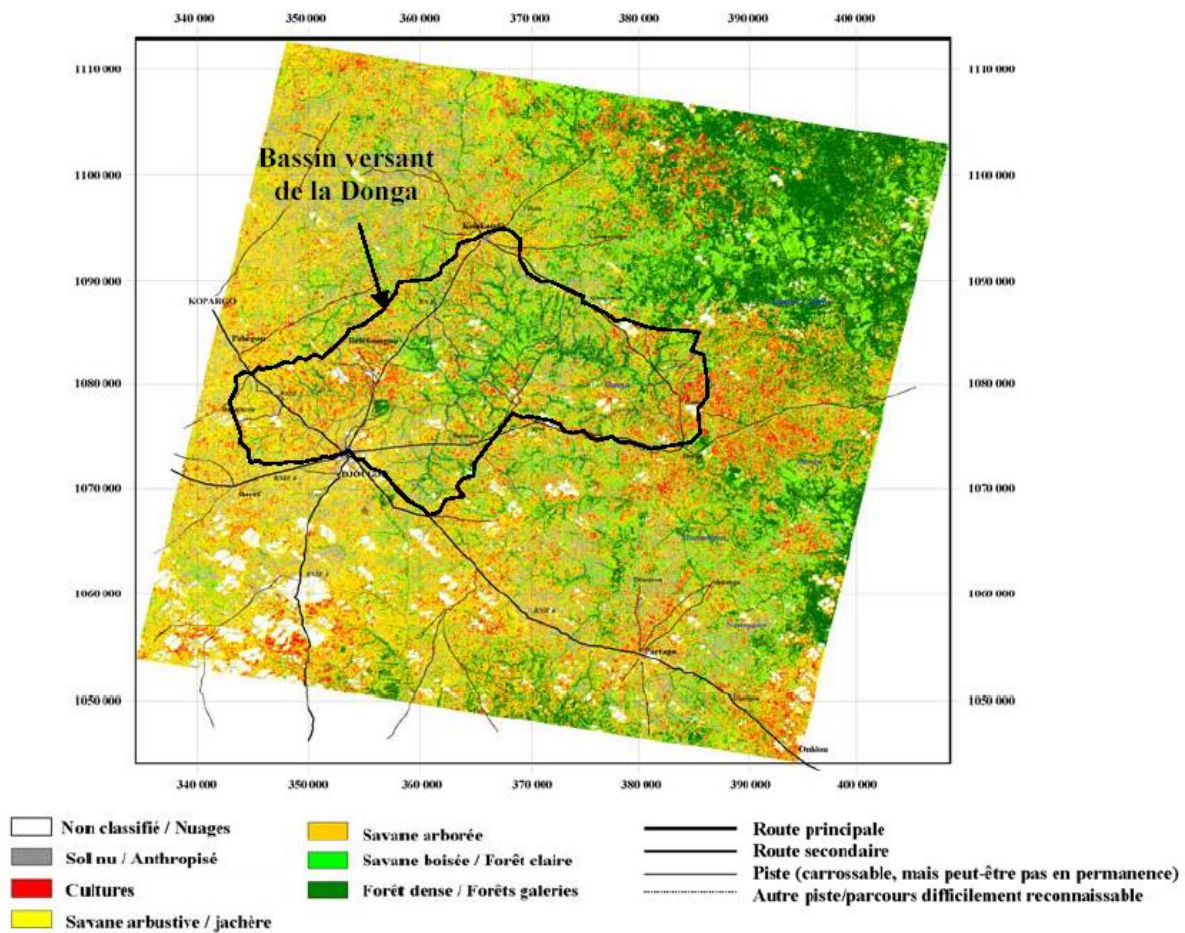


Figure 4: Carte d'occupation du sol (Zin et al., 2003)

II.5 Géologie

Le bassin versant de la Donga repose sur deux unités structurales: unités structurales de la plaine du Bénin et de l'Atacora. La majeure partie du bassin est occupée par l'unité structurale de la plaine du Bénin. Cette unité se compose de quatre formations géologiques qui affleurent par endroit. Au Nord-Ouest, des rares formations d'orthogneiss à muscovite, gneiss à amphibole et amphibolites schisteuses sont visibles. A l'ouest, on retrouve la «formation de Djougou» constituée de gneiss fins, de micachistes à muscovite et amphibolites schisteuses. Cette formation centrée sur Djougou, s'étire sensiblement nord-sud sur une bande de 10 km de large depuis la latitude 10°N au nord jusque vers la latitude 9°30 N au Sud. Au sud-ouest et dans toute la partie centrale du bassin (du nord au sud), on rencontre la formation dite « de la zone axiale ». Elle est composée de séquences diversifiées de migmatiques et de gneiss migmatitiques à biotite grenat. La partie orientale du bassin est occupée par « la formation de la Donga ». A l'affleurement, cette formation laisse apparaître

une alternance de gneiss fins et de leptynites à biotites et muscovites. Plusieurs contacts anormaux, probablement des failles ou des linéaments structuraux apparaissent également. L'unité structurale de l'Atacora couvre une petite partie de la pointe ouest du bassin et se compose de deux formations géologiques. La première est une formation linéaire (probablement intrusive) de quartzite à muscovite et la seconde de micachiste quartzeux à muscovite.

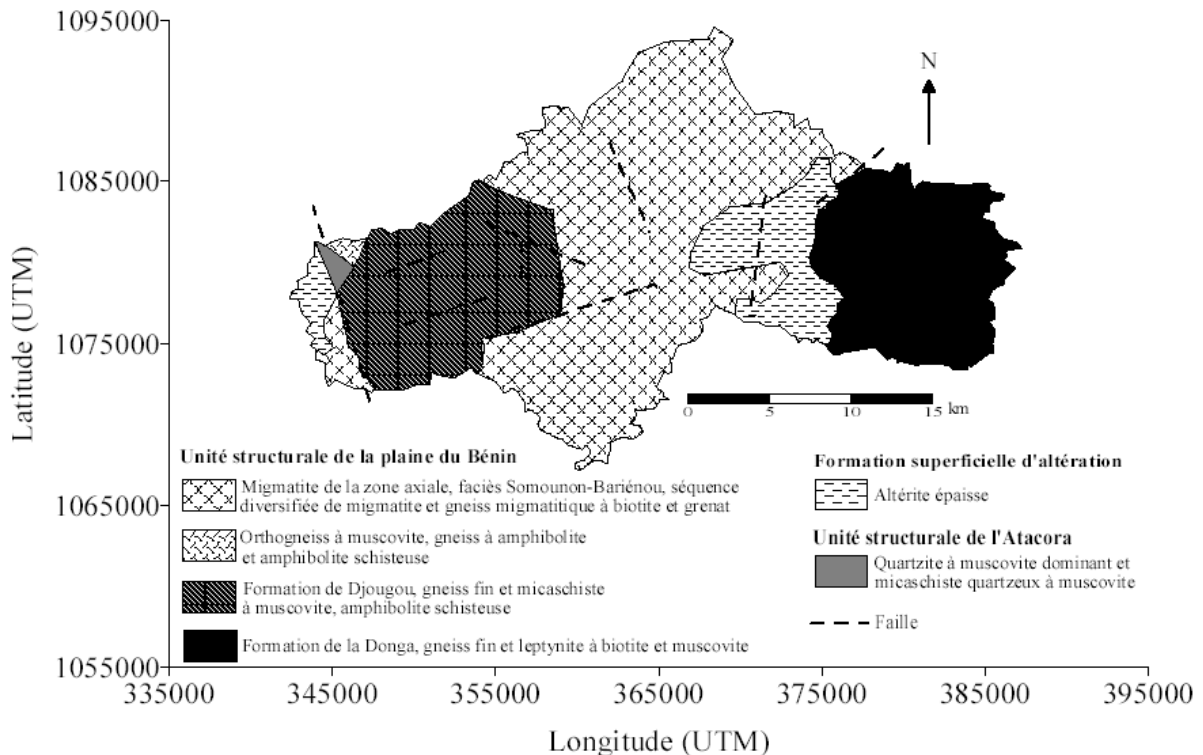


Figure 5: Carte géologique au 1/200 000e du bassin de la Donga (BRGM/OBM, 1984).

II.6 Pédologie

Le manteau pédologique résulte en général de l'action combinée de plusieurs facteurs tels que le climat, les formations végétales, la roche mère, l'altération, l'histoire géomorphologique et les actions anthropiques. Au centre-ouest du Bénin et plus particulièrement dans la zone d'étude, ce manteau est constitué de sols formés à partir des roches sédimentaires, du socle cristallin et des dépôts alluviaux (Faure, 1977 ; Faure et Volkoff, 1998). On distingue deux principaux types de sol ; les sols ferralitiques et les sols ferrugineux régionaux tropicaux.

Les sols ferralitiques (5% de la surface du sol) sont très peu observés dans la zone. Ce sont des sols profonds, caractérisés par une altération complète des minéraux primaires de la

roche et une élimination importante des bases aboutissant à la formation de minéraux kaolinitiques et des oxydes métalliques.

Les sols ferrugineux régionaux tropicaux (95 % de la surface du sol) sont constitués de sols peu lessivés en argile, de sols hydromorphes et de sols lessivés.

II.7 Hydrogéologie

L'hydrogéologie de la zone est caractérisée par une coexistence de deux réservoirs. L'un supérieur (réservoir d'altérite) avec un rôle fortement capacitif du fait de sa nature argileuse et l'autre sous-jacent (réservoir de socle), probablement en continuité hydraulique avec le premier et pouvant jouer un rôle transmissif du fait des fractures et diaclases (Kamagaté, 2006). Le réservoir d'altérite étudié présente une épaisseur très variable (3 à 20m) du fait de la très forte irrégularité de la limite supérieure du substratum.

Compte tenu de la position toujours haute de la nappe libre par rapport à l'axe de drainage le plus proche, le réservoir d'altérite serait en charge vis-à-vis des rivières qui constituent un potentiel naturel imposé et un drain aux eaux souterraines.

Les rares paramètres hydrodynamiques indiquent une relative faible porosité de l'aquifère (inférieure à 5 %) et une faible transmissivité (de l'ordre de $10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

II.8 Etat du réseau pluviographique

Au total, 16 pluviographes (de type OTT ou Elsyde Oedipe) forment le réseau pluviographique sur le bassin de la Donga à ce jour. La majeure partie du réseau (11 stations) a été mise en place en 2002. Antérieurement, depuis 1998, 5 stations existaient (Ananinga, Dapéréfoungou, Djougou, Donga et Gaounga) permettant une caractérisation spatiale limitée de la pluviométrie. Une station supplémentaire (Kpégonou) a été installée en 2003.

Les stations sont réparties de façon homogène sur les trois bassins emboîtés à l'exception de la partie orientale du bassin où le réseau a été densifié pour servir aux mesures radar. Le bassin est également pourvu d'une station météorologique servant aux mesures des paramètres climatiques nécessaires au calcul de l'ETP. En 2005, un radar X a été installé à Djougou en vue d'améliorer la connaissance de la dynamique spatio-temporelle des champs pluvieux.

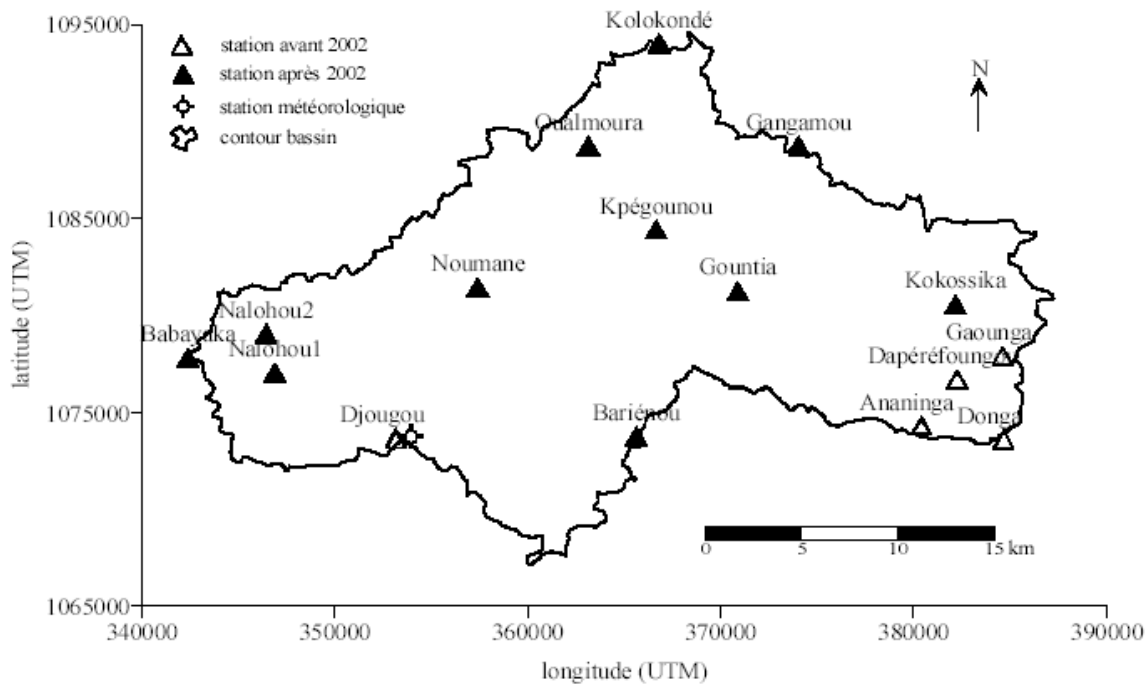


Figure 6: Réseau pluviographique et station météorologique (Kamagaté, 2006)

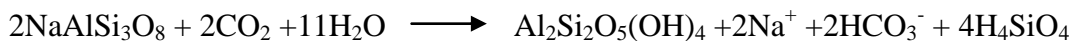
II.9 Minéralisation des eaux superficielles en milieux cristallins

Le processus le plus important dans l'acquisition de charge dissoute de l'eau est la dissolution. Ce processus est d'autant plus intense que la température et la diffusion sont importantes. Tout au long de son parcours sur le bassin, l'eau dissout les minéraux du sol et des roches qu'elle imbibe. Initialement très diluée, l'eau de pluie qui ruisselle n'a le temps de dissoudre que les éléments les plus solubles, contrairement à celle qui s'infiltre dont le temps de contact avec les minéraux est beaucoup plus long (Ambroise, 1998).

Les réactions de dissolution les plus couramment rencontrées sont (Al-Droubi, 1976) :

-Dissolution du quartz : $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$

-Hydrolyse de l'albite et précipitation de kaolinite :



Quant aux matières organiques, leur décomposition est faite par les micro-organismes du sol. Ce processus biologique conduit à la formation de substances chimiques pouvant enrichir la composition chimique des eaux de surface.

DEUXIEME PARTIE: ETUDE DES ECOULEMENTS DE LA CAMPAGNE 2005

I. Méthodologie

Ce travail s'est appuyé sur une équipe de chercheurs et de techniciens de l'IRD-Bénin ainsi que sur des sites déjà équipés. Nous avons également bénéficié des données de la campagne de 2005 sur lesquelles nos analyses ont portées. Nous n'avons participé qu'à la campagne de terrain de l'hivernage 2006 dont les échantillons sont en cours d'analyse chimique en laboratoire.

I.1 Matériels

I.1.1 Réseau hydrométrique

Le bassin de la Donga comporte six stations limnimétriques. Nos travaux de recherche ont porté sur trois des six stations (**figure 7**). Il s'agit des stations de:

- Ara pont (tête de bassin)
- Donga Kolo
- Donga pont (à l'exutoire du bassin).

Chaque station draine un sous bassin et est équipée d'un limnigraphe automatique (type *Thalimèdes*) (**Figure 8**) et d'échelles limnimétriques ayant fait l'objet d'un nivellement au GPS différentiel. Le descriptif des éléments de chaque station est présenté dans le **tableau 1**.

Tableau 1: Caractéristiques des stations de mesures hydrométriques considérées.

Stations	Lat. (UTM)	Long. (UTM)	Alt. (m)	Aire drainée (Km ²)	1 ^{ère} installation	Appareil
Ara-Pont	347524	1078332	457.19	13	05-mars-02	OTT Thalimèdes
Donga-Kolo	355931	1078274	409.9	105	03-mars-02	OTT Thalimèdes
Donga-Pont	384238	1073592	349.05	586	06-juin-98	OTT Thalimèdes

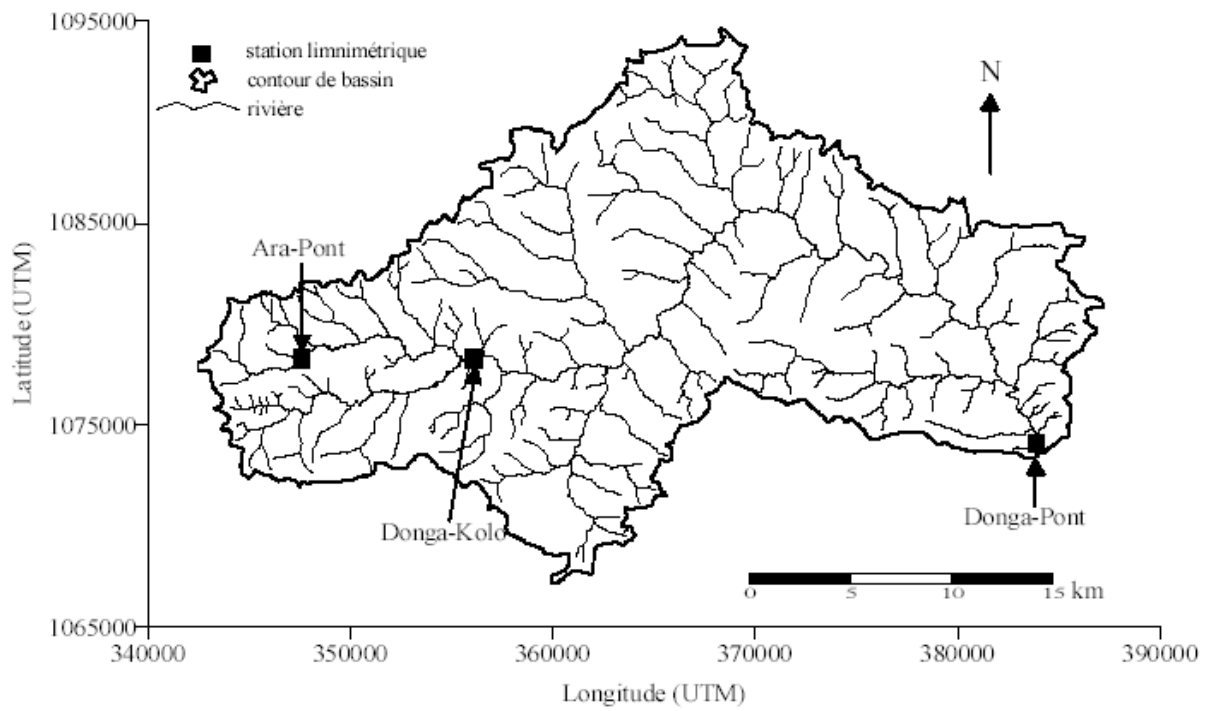


Figure 7: stations hydrométriques du bassin de la Donga (Kamagaté 2006)

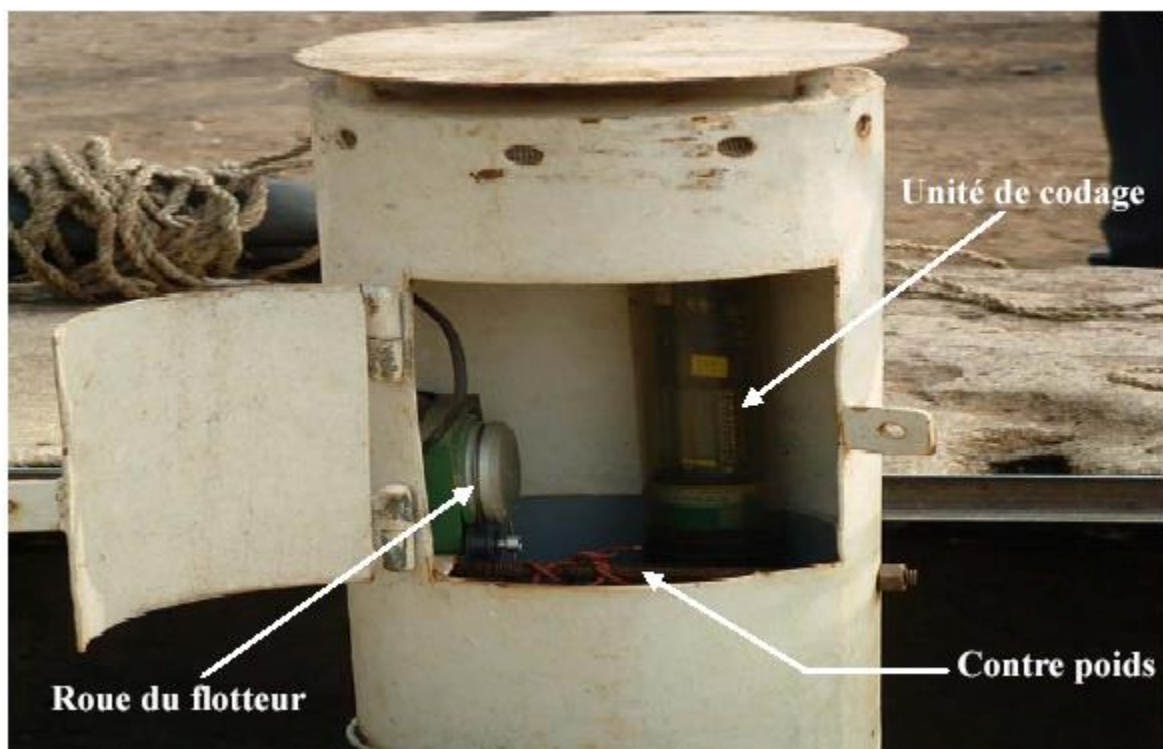


Figure 8: Limnigraphe automatique (Type Thalimèdes) et ses composantes

I.1.2 Dispositif de mesures hydrométriques

Deux types de mesures limnimétriques brutes sont réalisés aux différentes stations limnimétriques. Il s'agit des mesures « Enregistreurs » qui sont des mesures de hauteur d'eau effectuées au moyen de limnigraphe *Thalimèdes* et des mesures « Lecteurs » réalisées deux (2) fois par jour par un lecteur villageois.

Il importe de préciser qu'en dehors de ces deux types de mesures sus-citées, des campagnes de jaugeage sont réalisées aussi bien au moyen de moulinet pour les basses eaux qu'au moyen d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profilometer) pour les hautes eaux.

I.1.3 Dispositifs de prélèvement des échantillons pour les analyses hydrochimiques

Les 3 stations limnimétriques ci-dessus citées constituent également les points d'échantillonnage des eaux de surface. Les prélèvements sont effectués directement dans les rivières du début jusqu'à la fin des écoulements. Plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées au cours de l'année 2005. Les prélèvements sont effectués directement au moyen d'un seau en plastique attaché à une corde et lancé dans la rivière à partir du pont.

II. Mesures et analyses

II.1 Acquisition des données

II.1.1 Données hydrométriques

Au cours de ce travail, les données concernant les débits des différentes stations ont été obtenues à partir des données limnimétriques fournies par les différentes mesures à savoir: mesures « Enregistreurs » et mesures « Lecteurs ».

- Mesures « Enregistreurs » : Les enregistrements des hauteurs d'eau dans la rivière sont réalisés au moyen de *Thalimèdes* commandé par un flotteur installé dans le puits. Les mesures sont faites en continu et de façon automatique. Un couple constitué d'un contre-poids et d'un flotteur relié par un câble transmet la variation du niveau d'eau à une roue qui est l'unité de codage (**figure 8**). Le dispositif est à l'intérieur d'un tube PVC crépiné et surmonté par une guérite d'accès en tôle. Le mouvement de rotation généré est converti en un signal électrique transmis à l'unité d'acquisition via le câble de liaison et finalement enregistré en tant que résultat de mesure. Un afficheur indique alors de façon continue la hauteur d'eau actuelle, la date, l'heure, ainsi que l'état de la

pile. Une seule pile de 1,5 Volt assure au système une autonomie pouvant atteindre 15 mois.

- Mesures « lecteurs » : Elles sont réalisées deux fois par jour par des lecteurs villageois. A chaque passage, le lecteur relève dans un cahier de mesure conçu a cet effet, le niveau d'eau lu à l'échelle limnimétrique, la date et l'heure de mesure. Ces mesures ont servi à compléter les lacunes observées dans les mesures automatiques ou à corriger des décalages et des inversions de poulies.

II.1.2 Données hydrochimiques

Pour chaque échantillon prélevé, les paramètres physico-chimiques (Température et Conductivité électrique) de l'eau sont mesurés *in situ* à l'aide d'un multimètre. Tous les échantillons sont alors filtrés après chaque prélèvement dans des flacons en polyéthylène haute densité (HDPE) de type Nalgène à l'aide d'un filtre dont les pores ont une ouverture de 0,45µm. Il est indiqué sur chaque flacon, les informations suivantes :

- Station où le prélèvement a été effectué
- Date et heure de prélèvement
- Paramètres physico-chimiques mesurée in situ
- hauteur de l'eau à l'échelle
- identité de l'opérateur.

Ces échantillons sont d'abord convoyés vers la base pour les conserver au frais et envoyés ensuite à Cotonou. Après vérification à Cotonou, les échantillons sont expédiés au laboratoire de chimie des eaux d'Hydroscience Montpellier pour la détermination des éléments majeurs. En dehors des mesures effectuées sur les échantillons prélevés, les eaux des rivières sont suivies en continu au moyen de conductimètres automatiques de marque **Greenspan** (précision ± 0.2 %), installés à toutes les stations hydrométriques. La résolution temporelle adoptée varie d'une station à une autre suivant la superficie du bassin qu'elle draine. Elle est de 5 minutes à Ara-Pont et Donga-Kolo (Bassins de petite taille) et 30 minutes à Donga-Pont (Bassin plus grand).

Il importe de signaler que les conductimètres automatiques n'ont pas leurs sondes d'enregistrement calées à la plus basse côte des eaux. En effet, ces sondes sont dénoyées quand la hauteur de l'eau atteint un niveau donné et ces appareils cessent alors d'enregistrer. Il s'agit là d'une des limites de ces appareils.

II.2 Critique des données hydrochimiques

Certains échantillons présentent des résultats d'analyse dont nous doutons de la fiabilité. Ces échantillons ont une balance ionique (BI) ou électroneutralité (EN) supérieure au seuil fixé à $\pm 7\%$. Nous avons tenté d'apporter une correction afin de conserver le plus grand nombre possible d'échantillons. Nous avons alors utilisé la méthode de Appelo et Postma (1993), citée par Karambiri (2003) qui est la suivante :

-On convertit toutes les concentrations (mg/l) en méq/l :

$$[i]_{\text{méq/l}} = \frac{[i]_{\text{mg/l}} \times \text{Valence}(i)}{\text{Masse molaire}(i)} \quad \text{Pour un élément } i$$

-On calcule l'électroneutralité (EN) de l'échantillon :

$$EN(\%) = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad \text{Avec } \sum \text{cations} \text{ et } \sum \text{anions} \text{ en méq/l}$$

-Lorsque $EN \leq 7\%$ (en valeur absolue), on considère que les mesures sont correctes.

-Lorsque $EN > 7\%$ (en valeur absolue), on apporte une correction aux données :

-On calcule la conductivité électrique (*cond*) à partir des concentrations des cations et anions :

$$Cond^+_{(\mu\text{S/cm})} = 100 \times \sum \text{cations}]_{\text{méq/l}} \quad \text{et} \quad Cond^-_{(\mu\text{S/cm})} = 100 \times [\sum \text{anions}]_{\text{méq/l}}$$

-On calcule ensuite un coefficient correcteur (CC) pour les cations et les anions:

$$CC^+ = 1 + \frac{Cond_{\text{mesurée}} - Cond^+}{Cond_{\text{mesurée}}} \quad \text{et} \quad CC^- = 1 + \frac{Cond_{\text{mesurée}} - Cond^-}{Cond_{\text{mesurée}}}$$

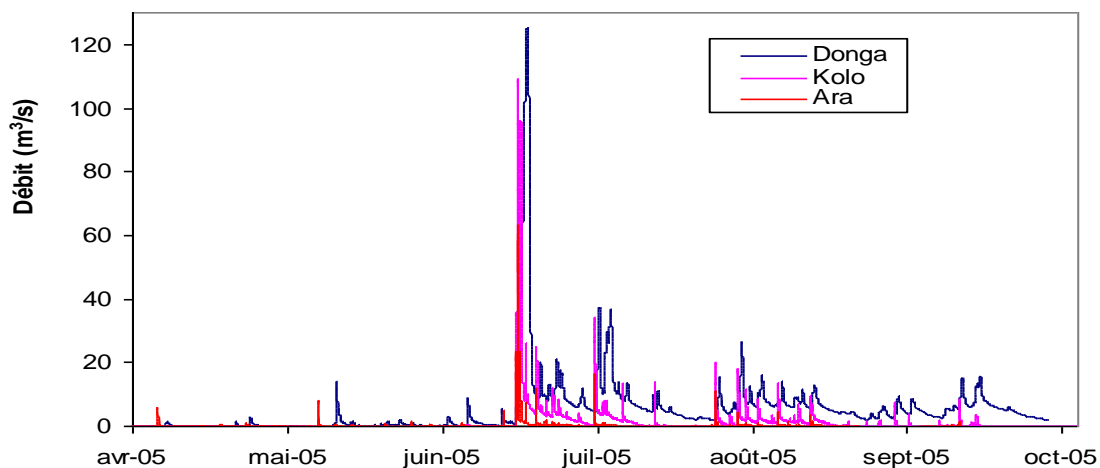
- On multiplie enfin ces coefficients correcteurs CC^+ et CC^- respectivement par les concentrations des cations et des anions de l'échantillon.

Malgré ces corrections, certains échantillons ont toujours gardé une électroneutralité (EN) supérieure à 7%. Dans le souci d'avoir un nombre assez représentatif d'échantillons, nous avons dû garder ces échantillons car la différence entre l'électroneutralité de ces derniers et le seuil (fixé à 7 %) reste négligeable (autour de 5 % en général).

III. Résultats

III.1 Débits instantanés

La **figure 9** présente les débits instantanés enregistrés aux différentes stations limnimétriques du bassin. En effet, les écoulements ont véritablement commencé en 2005 vers la fin du mois de juin et ont pris fin en octobre sur l'ensemble du bassin. Les débits instantanés maximums enregistrés sont de 70 m³/s pour Ara-Pont, 104 m³/s pour Donga-Kolo et 125 m³/s pour Donga-Pont. Il apparaît donc que 2005 présente des écoulements plus importants (liés sans doute à l'importance des événements pluvieux) que les années 2002 et 2004 dont les maxima de débits enregistré à Donga-Pont sont respectivement 55 et 51 m³/s mais moindres que 2003 au cours de laquelle le débit maximum enregistré est de 150 m³/s à la



même station.

Figure 9: Débits instantanés aux différentes stations du bassin

Les volumes d'eau ayant transité par la station hydrométrique de Donga-Kolo pendant les années 2003, 2004 et 2005 sont résumés dans le **tableau 2**. Le volume d'eau (V) à une station hydrométrique est calculé par intégration de l'hydrogramme de crue sur la durée des chroniques. Son expression est de la forme :

$$V = \int_{t_0}^{t_f} Q(t) dt \text{ Avec } t_0 \text{ le début de la chronique et } t_f \text{ la fin de la chronique.}$$

Nous avons approximé cette intégrale par la méthode des trapèzes.

Tableau 2: Volumes annuels enregistrés à la station de Donga-Kolo

Années	Durée des chroniques	Volume écoulé (10^3 m^3) (Donga-Kolo)
2003	Du 26/06/03 12h 00 au 20/10/03 17h 00	39 780
2004	Du 13/06/04 14h 30 au 20/10/04 11h 30	11 085
2005	Du 29/04/05 7h 10 au 17/11/05 05h 00	19 978

A la lecture de ce tableau, on constate que l'année 2005 présente un écoulement intermédiaire entre les années 2003 et 2004.

III.2 Ecoulements de base

Parmi les prélèvements effectués, certains ont été faits en période de crue et d'autres pendant les écoulements de base. Les échantillons correspondants aux écoulements de base ont été sélectionnés. Selon Kamagaté (2006), le critère de sélection principal est que le prélèvement est réalisé pendant une période de diminution des débits en dehors des crues. L'hydrogramme présente dans cette période une allure plus ou moins plate.

L'utilité de la connaissance des propriétés des débits de base est qu'ils permettent d'avoir une idée sur l'origine des écoulements. En zone tropicale de socle, ces débits sont majoritairement d'origine souterraine (écoulement hypodermique et écoulement souterrain profond) (Bariac *et al.*, 1995 ; Gremillon *et al.*, 2000 ; Tardy *et al.*, 2004). Ainsi, la connaissance des caractéristiques géochimiques de ces écoulements constitue donc une étude indirecte des flux souterrains contribuant aux écoulements de surface.

Les figures 10, 11 et 12 montrent les hydrogrammes avec les dates d'échantillonnage correspondant aux crues et aux écoulements de base aux trois stations. L'étude des écoulements de base sera abordée plus loin en détail (**au chapitre III.6**).

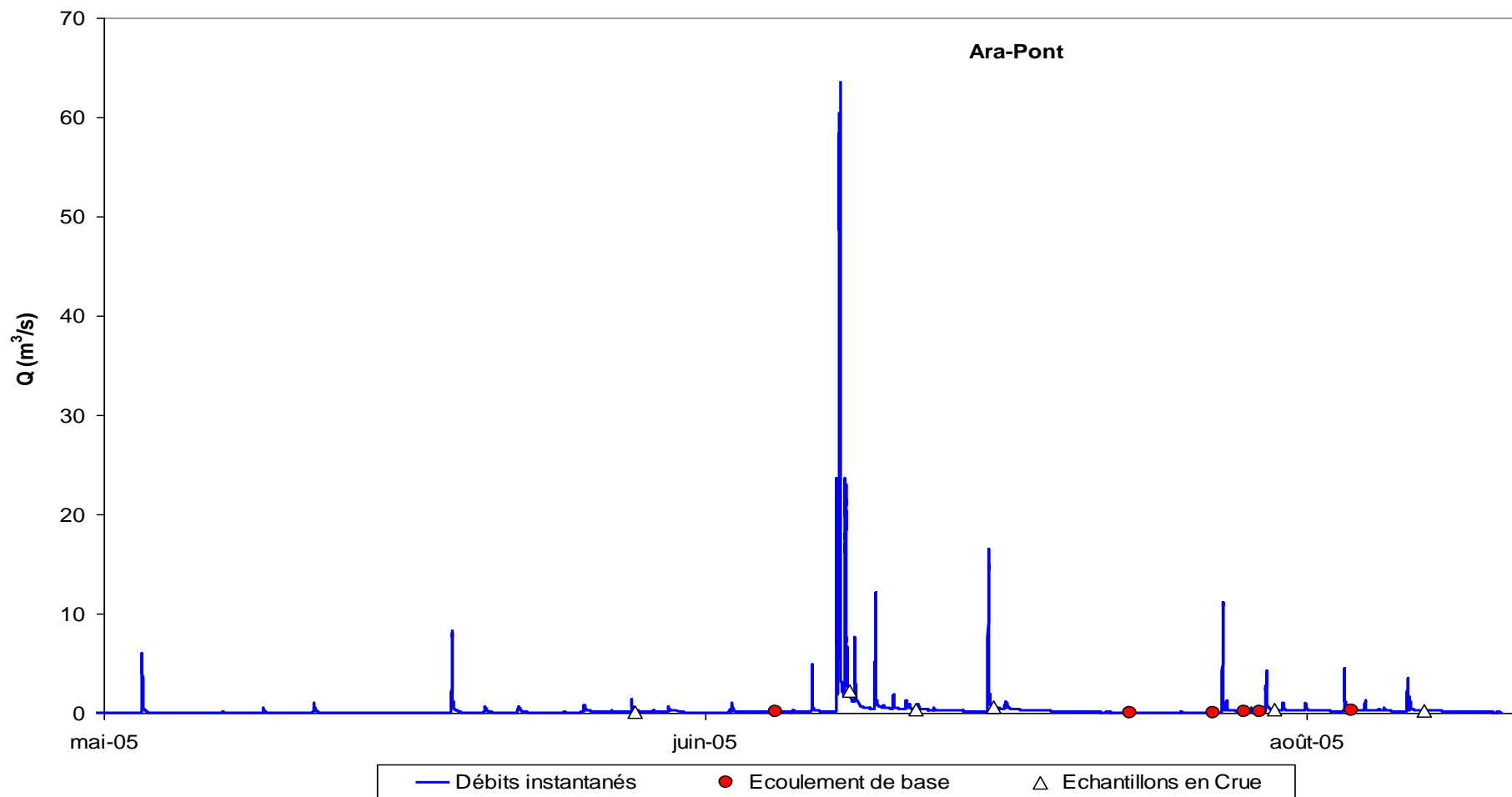


Figure 10: Hydrogramme de l'année 2005 avec date de prélèvement (écoulement de base en point rouge et crue en point blanc) à Ara-Pont

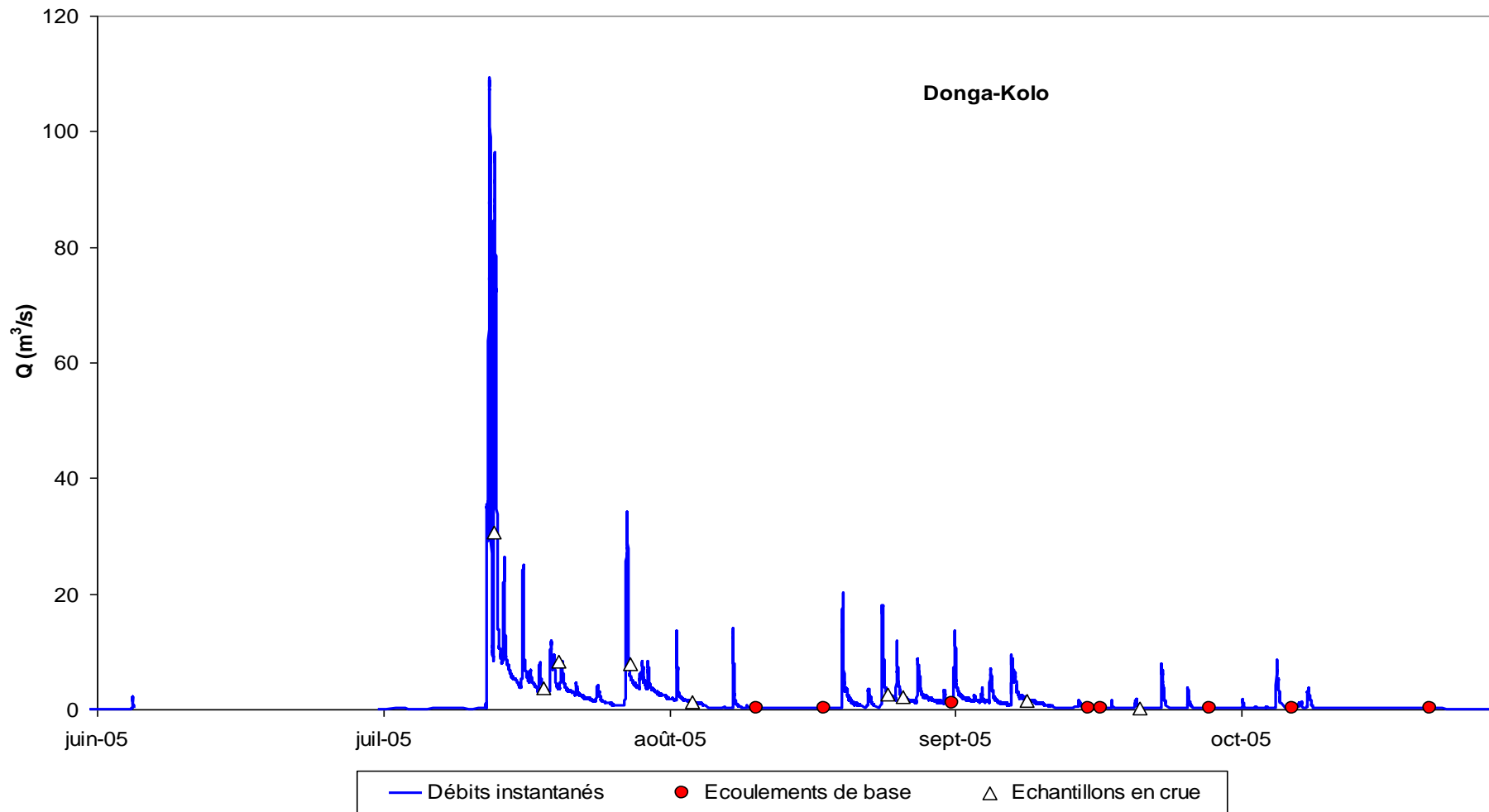


Figure 11: Hydrogramme de l'année 2005 avec dates de prélèvement (écoulement de base en point rouge et crue en point blanc) à Donga-Kolo

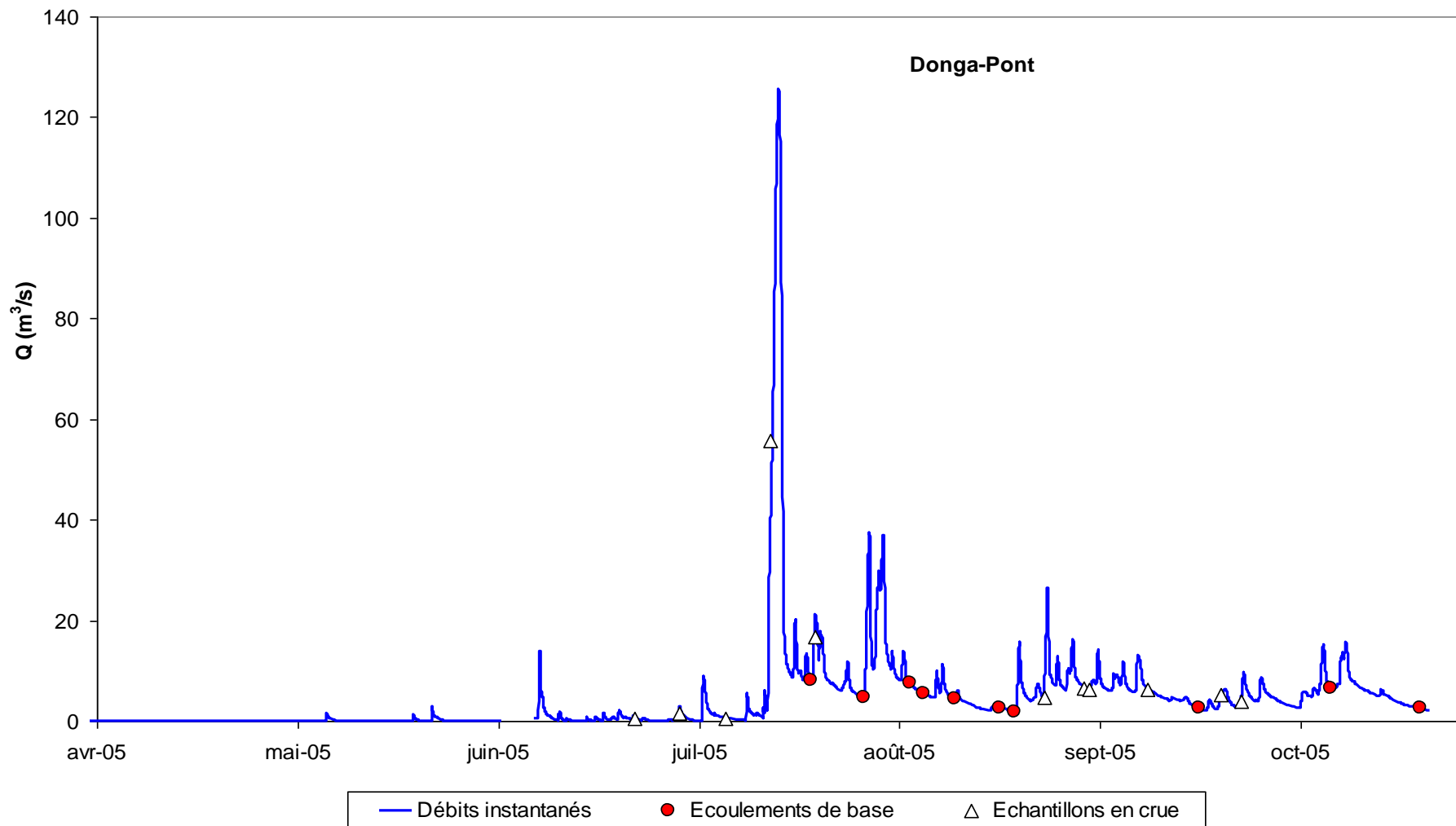


Figure 12: Hydrogramme de l'année 2005 avec date de prélèvement (écoulement de base en point rouge et crue en point blanc) à Donga-Pont

III.3 Evolution temporelle de la conductivité aux différentes stations

La **figure 13** rend compte de l'évolution temporelle de la conductivité aux trois stations hydrométriques. Les points agrandis sur la courbe de variation de la conductivité correspondent aux écoulements de base.

A la station de Ara-Pont, en début de saison, une diminution brutale de la conductivité a été observée (de 64,4 $\mu\text{s/cm}$ à 37,6 $\mu\text{s/cm}$) et ceci suite à une petite crue. Cette valeur tend à monter légèrement (de 37,6 à 39,9 $\mu\text{s/cm}$) avant de chuter à sa plus basse valeur de l'année (19,4 $\mu\text{s/cm}$ à la mi-juillet) et consécutivement à la plus grande crue de l'année. A partir de ce moment, les valeurs de conductivité commencent par augmenter progressivement (jusqu'à 37,3 $\mu\text{s/cm}$) vers la fin du mois d'août. A partir de cette date jusqu'à la fin de la saison pluvieuse (fin octobre), les valeurs de conductivité restent à peu près constantes sauf une légère baisse entre août et septembre où elles tendent à diminuer très légèrement.

A Donga-Kolo, les valeurs de la CE présentent une évolution très irrégulière au cours du temps. Elle subissent des variations en dents de scie en début de saison et atteignent leur minimum (31,4 $\mu\text{s/cm}$) à la mi-juin (consécutivement à la plus grande crue de l'année). Ces valeurs ont par la suite progressivement augmenté et de façon synchronisée avec la baisse de crue jusqu'à 72,7 $\mu\text{s/cm}$) avant de chuter à nouveau, suite à une nouvelle crue. Une augmentation s'en est suivie jusqu'à la fin de la crue. Entre août et septembre, on assiste à de faibles variations de la conductivité consécutivement à une série de petites crues. De fin septembre jusqu'à la fin de la saison, les valeurs de la CE ont progressivement augmenté jusqu'à leur valeur maximale (95,2 $\mu\text{s/cm}$), dépassant d'ailleurs la valeur de début de saison.

Quant à Donga-pont, les valeurs de conductivité ont brutalement baissé en début de saison (de 84 $\mu\text{s/cm}$ à 42 $\mu\text{s/cm}$). Après une légère augmentation, ces valeurs ont progressivement baissé jusqu'à leur valeur minimale (20 $\mu\text{s/cm}$) et ceci au cours de la plus grande crue de l'année (à la mi-juin). A la baisse de cette crue, on constate une augmentation de la conductivité (jusqu'à 57 $\mu\text{s/cm}$) avant d'assister à une nouvelle chute de celle-ci jusqu'à 25,5 $\mu\text{s/cm}$ précédemment à une crue mais moins importante que la précédente. A partir de ce moment, une nouvelle augmentation progressive de la conductivité est observée jusqu'à 80, $\mu\text{s/cm}$ correspondant à une période de basses eaux. Une autre légère baisse est intervenue et consécutivement à une série de petites crues. A la fin de cette série de crue, une légère augmentation de la conductivité est survenue jusqu'à la valeur précédente. On assiste par la suite à une légère baisse qui est suivie d'une augmentation suite à une petite crue. A la fin de

la saison, une augmentation de la CE est observée et ceci jusqu'à une valeur largement supérieure à la valeur initiale (139,4 $\mu\text{s}/\text{cm}$).

Par ailleurs, on constate qu'en écoulement de base, l'eau garde pour la plupart des échantillons, une CE élevée contrairement aux périodes de crue où les plus basses valeurs sont enregistrées.

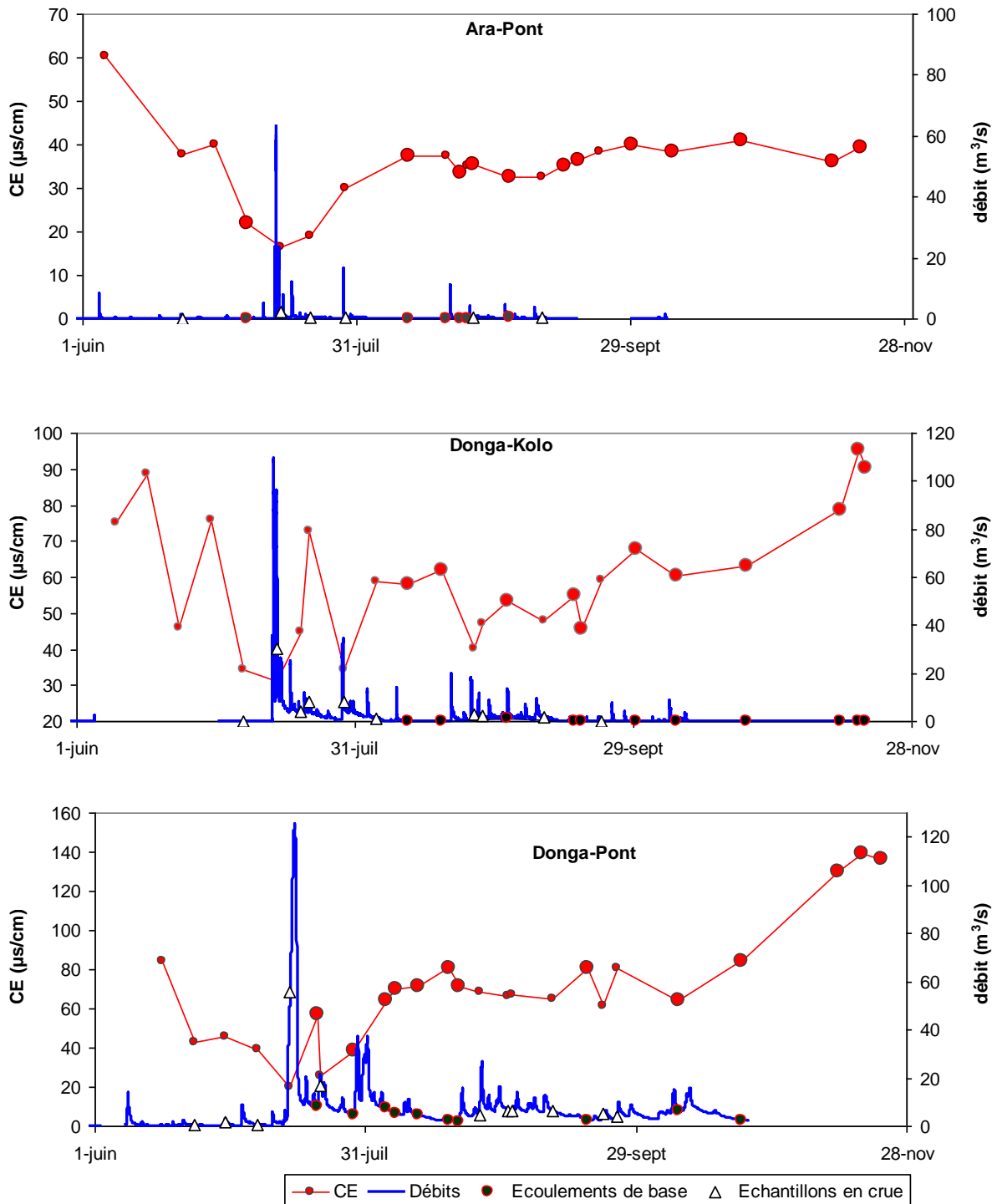


Figure 13: Evolution temporelle de la conductivité aux différentes stations (Gros points = écoulement de base).

III.4 Evolution temporelle des éléments majeurs dans les écoulements

Les graphes ci-dessous (figure 14 à 21) présentent l'évolution des éléments majeurs dans le temps. Les points particuliers (gros et arrondis) correspondent aux écoulements de base.

III.4.1 Les cations

➤ Le magnésium (Mg^{++})

La station de Donga présente des teneurs en Mg^{++} plus élevées (2 à 3 fois) que celles de Kolo et de Ara durant toute la saison pluvieuse (**figure 14**). Au niveau de ces dernières, ces valeurs sont restées quasiment constantes après une légère baisse en début de saison.

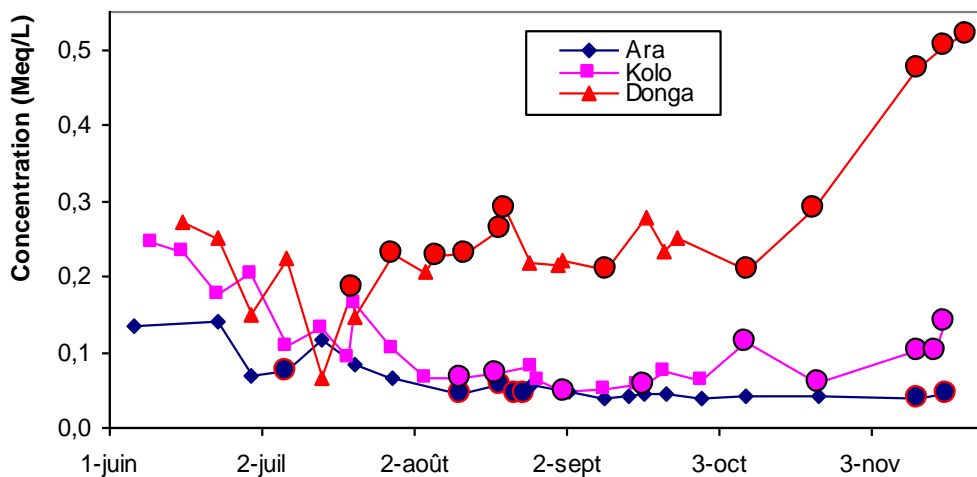


Figure 14: Teneur en Magnésium aux différentes stations.

➤ Le Potassium (K^+)

Contrairement au magnésium, la station de Donga-pont présente une faible teneur en potassium par rapport aux autres stations (**Figure 15**). Ces valeurs connaissent une légère diminution au niveau de toutes les stations d'ailleurs en début de saison jusqu'à un minimum. Elles subissent par la suite de très faibles fluctuations notamment à Ara-pont et à Donga-Kolo. A Donga-pont, les fluctuations sont plus remarquées avec une augmentation progressive en fin de saison.

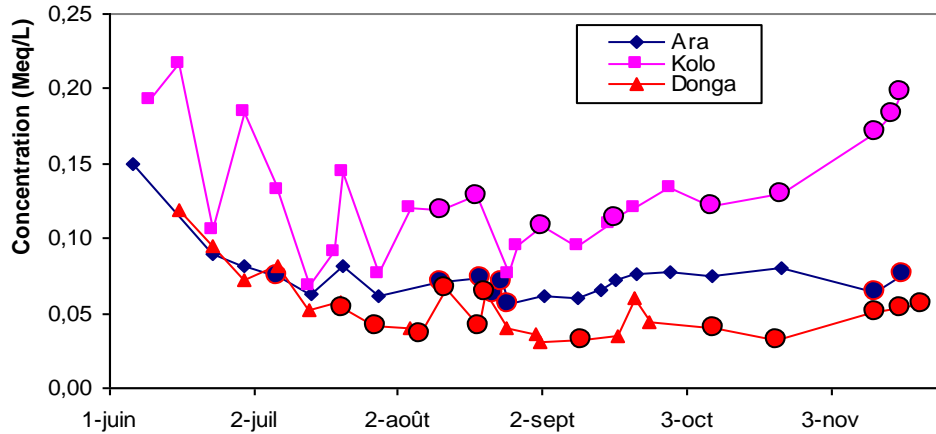


Figure 15: Teneur en Potassium aux différentes stations

➤ **Le Calcium (Ca^{++})**

Comme le magnésium, le calcium présente pour la plupart du temps, des teneurs plus élevées à Donga avec une brusque augmentation en fin de saison alors qu'aux autres stations (Kolo et Ara), après les faibles fluctuations observées du début de la saison jusqu'à fin Juillet, cette valeur reste quasiment constante jusqu'à la fin de la saison (**Figure 16**).

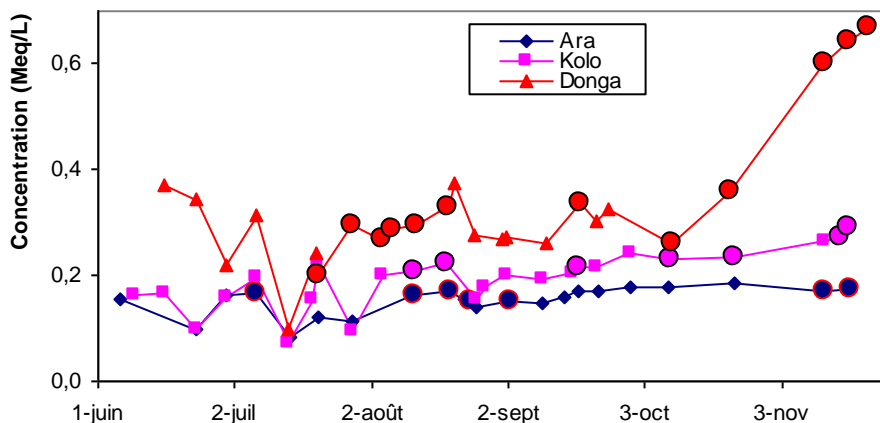


Figure 16: Teneur en Calcium aux différentes stations

➤ **Le Sodium (Na^+)**

A la station de Ara, la teneur en Na^+ est restée plus faible et constante du début jusqu'à la fin de la saison (entre 0,075 méq/l et 0,05méq/l). Quant à la station de Kolo, sa teneur a progressivement baissé du début de la saison jusqu'à la mi-juillet et y est relativement restée constante jusqu'à la fin de la saison. C'est à Donga que les plus fortes concentrations ont été enregistrées. Initialement faible en début de saison (jusqu'à la mi-juillet), la concentration a progressivement augmenté jusqu'à atteindre sa valeur maximale en fin de saison.

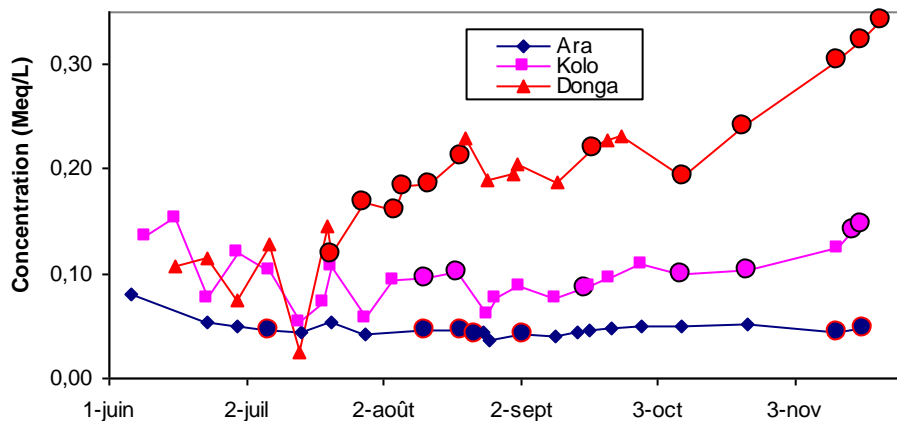


Figure 17: Teneur en Sodium aux différentes stations

III.4.2 Les anions

➤ Les Nitrates (NO_3^-)

On remarque une fluctuation importante des teneurs en nitrate en début de saison (entre juin et juillet) au niveau des trois stations avec cependant des teneurs plus importantes à Donga (**figure 18**). Ces valeurs s'annulent pratiquement et demeurent ainsi aux trois stations entre mi-juillet et fin septembre aux trois stations. Vers la fin de la saison, une légère augmentation est observée à Kolo notamment ainsi qu'à Donga alors qu'à Ara, le taux demeure nul.

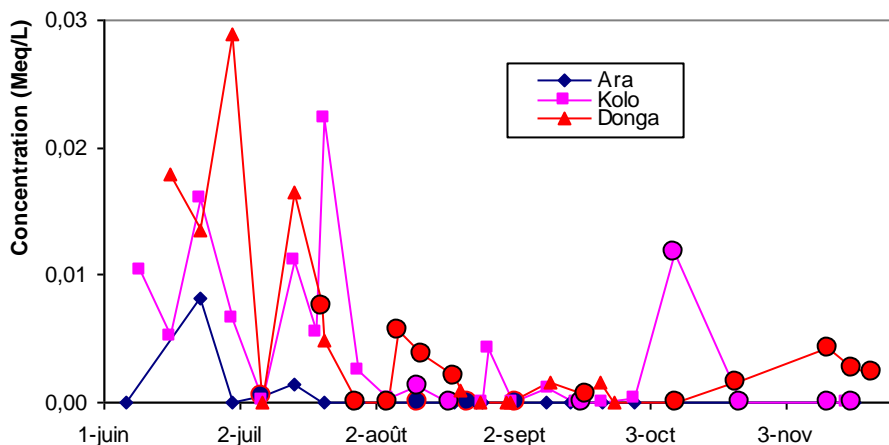


Figure 18: Teneur en Nitrates aux différentes stations

➤ Les sulfates (SO_4^{2-})

La teneur en sulfate devient pratiquement nulle sur toute la saison pluvieuse à Ara (**Figure 19**). Quant aux autres stations, cette valeur reste pratiquement constante sauf une brusque augmentation observée en début de saison à Donga-Kolo.

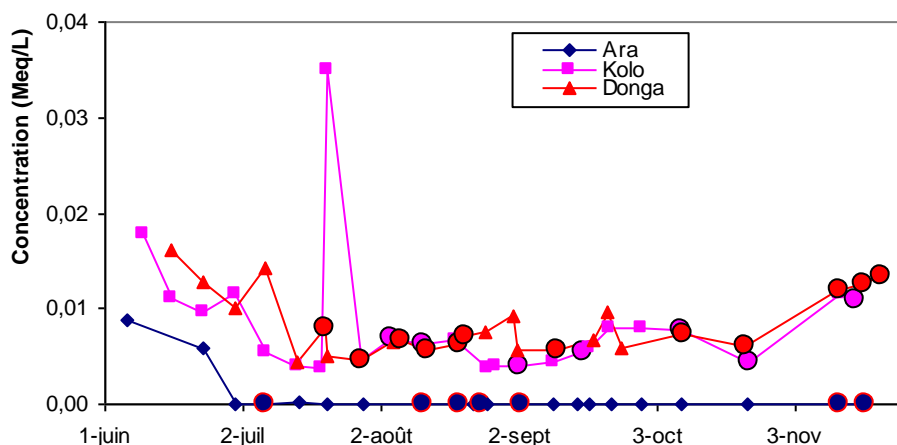


Figure 19: Teneur en sulfates aux différentes stations

➤ **Les Carbonates (HCO_3^-)**

On note des teneurs en bicarbonates de plus en plus élevées de l'amont vers l'aval. Ce taux qui a connu une diminution progressive en début de saison à subir une légère fluctuation à Ara et à Kolo. Par contre, à Donga, la concentration en bicarbonate a considérablement augmenté en fin de saison.

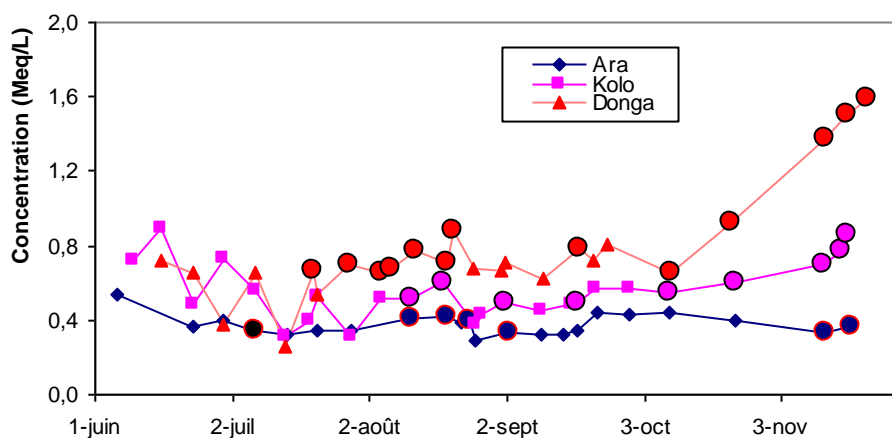


Figure 20: Teneur en Bicarbonates aux différentes stations

➤ **Le Chlore (Cl^-)**

Le chlore a connu les mêmes fluctuations que les sulfates aux trois stations, à la différence que les concentrations en chlore sont plus élevées que celles des sulfates. Ces deux éléments présentent une hausse brutale de leurs concentrations à la même date à la station de Donga-Kolo. Ce comportement singulier nous paraît inexplicable.

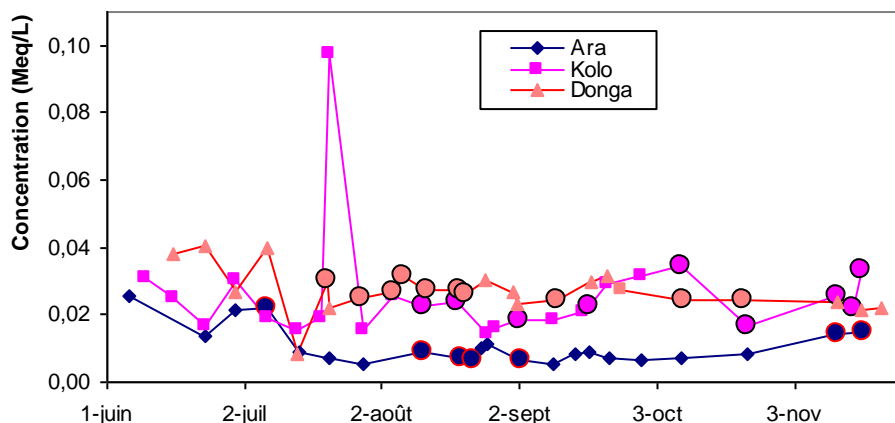


Figure 21: Teneur en Chlore aux différentes stations

Remarque globale

De façon globale, nous observons pour l'ensemble des éléments chimiques, une concentration d'abord élevée en début de saison de pluie puis une diminution progressive au cours de la saison et une réaugmentation en fin de saison. Certains éléments présentent cependant des teneurs faibles du début à la fin de la saison. La plupart des échantillons prélevés en écoulement de base ont une forte concentration en ces éléments.

Pour tous les éléments sauf le potassium qui présente un comportement singulier, on constate une augmentation des teneurs d'amont vers l'aval ($C_{\text{-Ara}} < C_{\text{-Kolo}} < C_{\text{-Donga}}$). Cette augmentation de teneurs d'amont vers l'aval peut s'expliquer par un enrichissement progressif de l'eau en éléments chimiques issus de la dissolution des matières en suspension transportées par l'eau le long de son trajet.

En ce qui concerne le potassium, l'ordre d'importance observé est le suivant: $C_{\text{-Donga}} < C_{\text{-ara}} < C_{\text{-Kolo}}$. Ce comportement particulier du potassium nous paraît difficile à expliquer. La seule cause soupçonnée serait éventuellement une pollution locale due à l'utilisation en excès du KCl, un intrant agricole sur les versants de la station hydrométrique de Donga-Kolo, ce composé pouvant libérer excessivement le potassium (K^+) à sa dissolution. Karambiri (2003) a cependant attribué la présence d'une partie des ions K^+ dans les eaux de ruissellement aux échanges cationiques au cours des crues, ce phénomène pouvant se produire à une intensité plus ou moins forte d'un endroit à l'autre sur l'ensemble du bassin.

III.4.3 Evolution temporelle du silicium (Si) à Donga-Pont

Pour l'instant, le dosage de la silice n'a pu être fait que pour les échantillons de la station de Donga-pont. Concernant Ara pont et Donga-Kolo les analyses sont toujours en cours. Nous nous contenterons donc de ces valeurs disponibles pour nos commentaires.

Comme l'indique la **figure 22**, nous observons de très fortes fluctuations de la concentration du silicium en début de saison de pluie (jusqu'à la mi-août). La plus forte valeur (15,5 mg/l) ainsi que la plus faible valeur (5mg/l) annuelle ont été enregistrées au cours de cette période. De la mi-août à la fin de la saison, la teneur en Si est restée pratiquement constante et proche de la valeur de début de saison (10,6 mg/l). On note cependant une légère baisse à la mi-septembre. A la différence des majeurs, la teneur de la silice n'augmente pas en fin de saison.

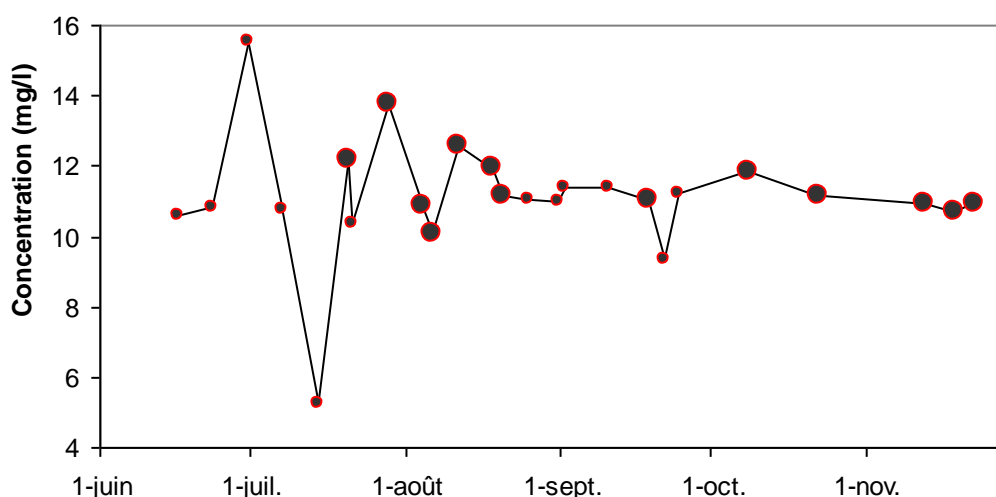


Figure 22: Evolution temporelle du silicium (Si) à Donga-Pont (Gros points = écoulements de base).

III.5 Faciès des eaux

Pour l'analyse des faciès type des eaux, le diagramme de Piper (**figure 23**) a été utilisé. En effet, nous constatons à la lecture de ce diagramme que sur l'ensemble du bassin, les eaux ont une signature bicarbonatée calco-magnésien comme celles des années antérieures. Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} et Na^+ , K^+) sont pratiquement tous en proportion sensiblement égale. Parmi les anions, seuls les carbonates se sont bien exprimés (plus de 90%); les autres anions (NO_3^- , Cl^- et SO_4^-) étant en très faible proportion.

De façon détaillée, nous distinguons que les stations de Donga-Kolo et de Ara-pont présentent deux paquets au niveau des cations. Ce deuxième paquet d'échantillons, en nombre relativement faible présente une proportion en Ca^{++} légèrement plus faible que la majorité des

échantillons. Ces échantillons sont pour la plupart prélevés dans les crues de début de saison aux différentes stations.

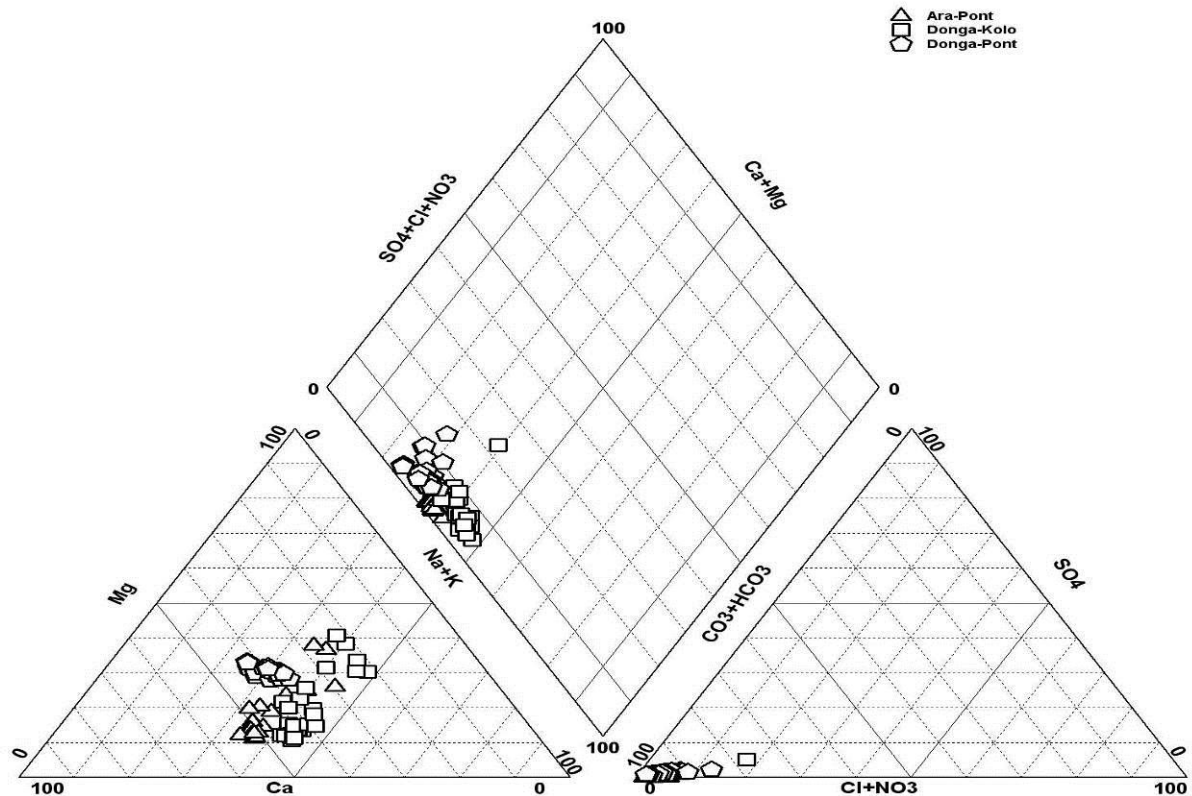


Figure 23: Diagramme de Piper pour les écoulements superficiels aux différentes stations de la Donga (Toute saison).

III.6 Etude des écoulements de base

III.6.1 Variation de la conductivité dans les débits de base aux trois stations

Comme énoncé plus haut, l'utilité de la connaissance des propriétés des débits de base est qu'ils permettent d'avoir une idée sur l'origine des écoulements.

La **figure 24** présente les variations de conductivité électrique (CE) en fonction des débits de base pendant la période 2003-2004 d'une part et en 2005 d'autre part. Globalement, les tendances sont identiques d'une année à une autre. Ainsi la CE diminue avec l'augmentation du débit sur l'ensemble du bassin. Cependant, les valeurs de CE enregistrées pendant la campagne 2005 sont en légère baisse par rapport à celles enregistrées les années antérieures. Nous avons attribué cette différence de comportement aux différents

conductimètres utilisés d'une année à une autre qui ne sont pas rigoureusement étalonnés de façon identique. Aussi, peut-on lier ce fait à une minéralisation plus ou moins accentuée des eaux d'une année à une autre.

Par ailleurs, d'amont en aval on remarque, une augmentation des valeurs de la CE. Ce comportement pourrait être soit le fait d'une évaporation de l'eau au cours de son transit, soit le fait d'un apport souterrain plus important.

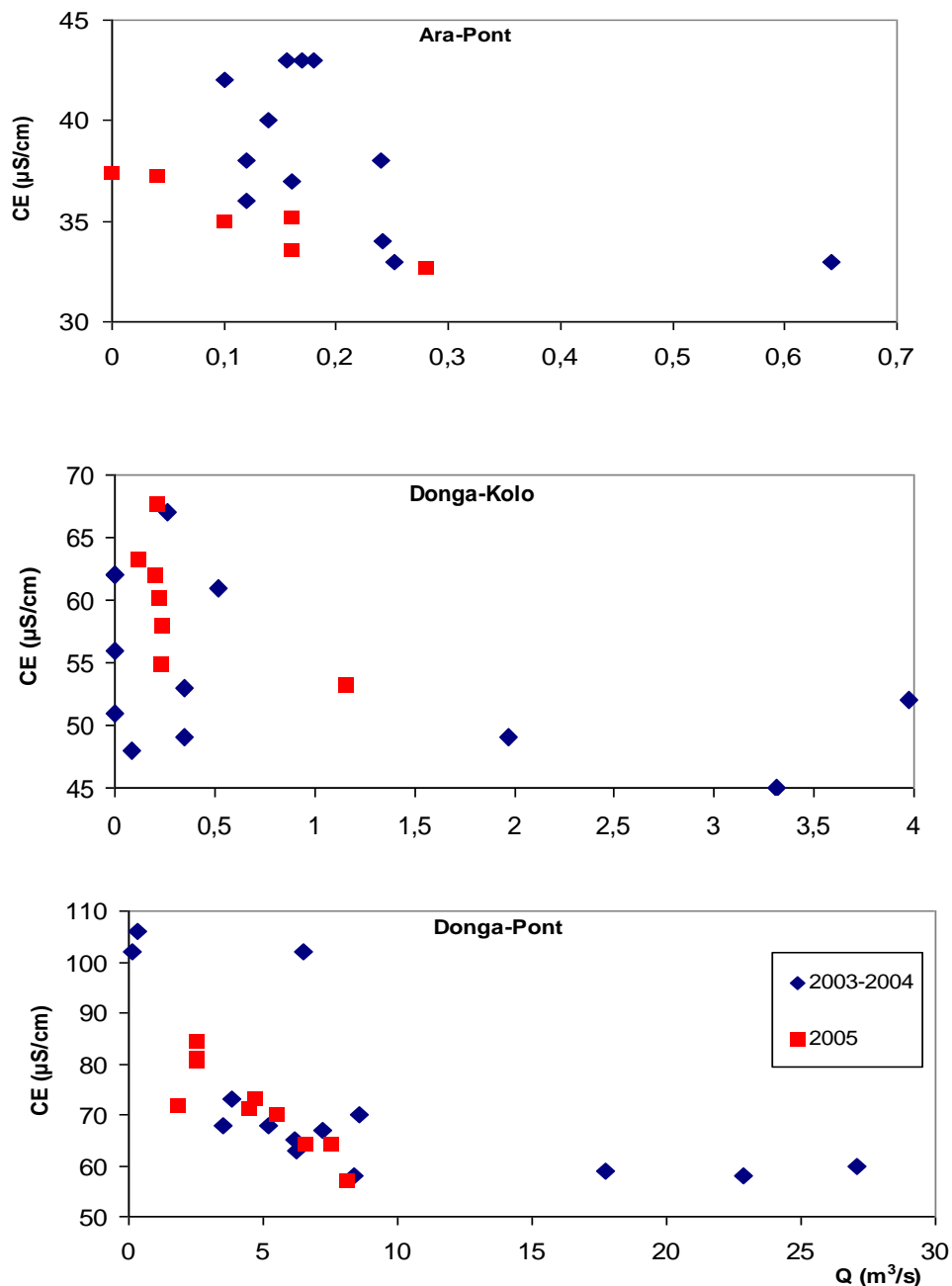


Figure 24: Evolution de la CE pendant les écoulements de base aux trois stations.

III.6.2 Teneurs des majeurs en fonction des débits de base aux trois stations.

- **Cas des anions.**

Dans les écoulements de base comme ailleurs pendant les crues, seuls les bicarbonates sont présents à un taux significatif (**figure 25**). En effet, les autres éléments (NO_3^- , Cl^- , SO_4^-) ont une teneur très faible durant toute la saison. Nous observons une augmentation de la concentration de HCO_3^- avec la diminution des débits de base sans distinction au niveau des différentes stations. Ces concentrations en bicarbonate augmentent de la tête vers l'exutoire du bassin. L'ordre d'importance des éléments pour toutes les stations se présente comme suit: $\text{HCO}_3^- \gg \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- \equiv \text{SO}_4^-$. Cet ordre est identique à celui observé par Kamagaté en 2006 au cours des études précédentes sur le bassin.

- **Cas des cations**

Aux stations de Donga-Kolo et de Donga-Pont, nous assistons à une diminution progressive des concentrations au fur et à mesure que le débit de base augmente (**Figure 25**). A la station de Ara-Pont, ce comportement se dessine moins. Les autres éléments ont un comportement plus ou moins stable en fonction du débit de base. Soulignons que contrairement aux anions qui adoptent le même ordre d'importance sur l'ensemble du bassin, cet ordre varie d'une station à une autre au niveau des cations:

- Ara-Pont: $\text{Ca}^{++} > \text{K}^+ \equiv \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+$
- Donga-Kolo: $\text{Ca}^{++} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++}$
- Donga-Pont: $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$

Il apparaît donc que le Ca^{++} demeure le cation le plus dominant sur l'ensemble du bassin dans les écoulements de base.

Seule la station de Donga-Pont garde un ordre d'importance des éléments identique à celui des études antérieures menées par Kamagaté en 2006. Il importe cependant de signaler que contrairement à nos résultats, cet auteur a plutôt enregistré au cours de ces études, en dehors de la station aval (Donga-pont), une constance de la teneur des cations en fonction des débits de base.

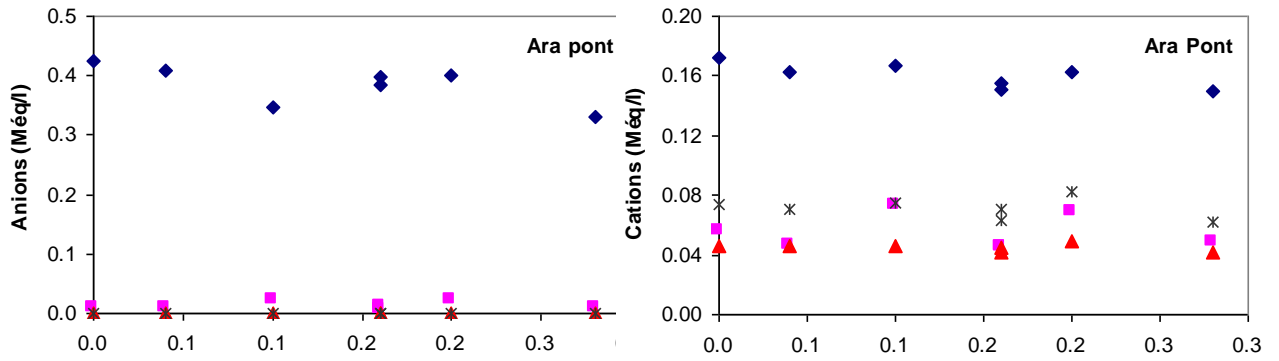


Figure 1

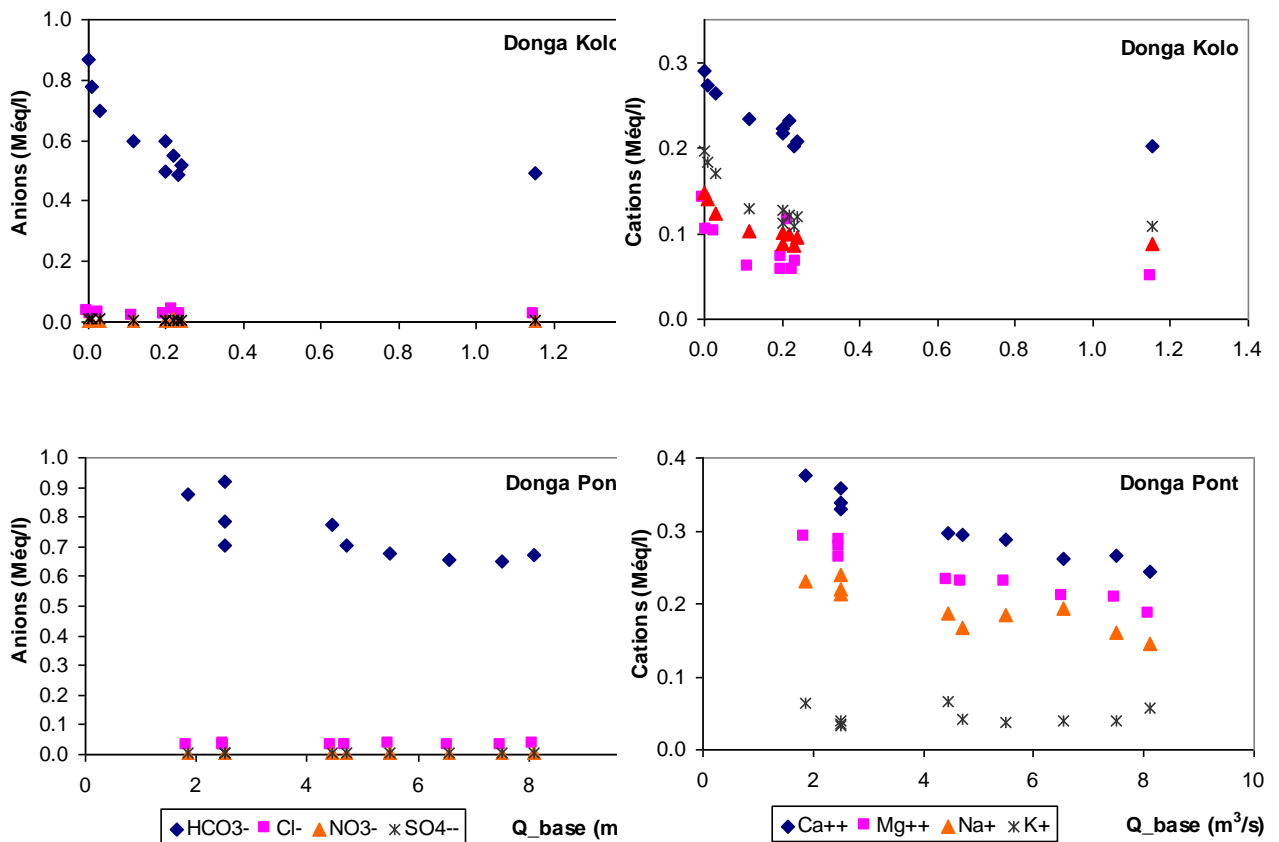


Figure 25: Teneurs des éléments majeurs dans les écoulements de base (Donga pont)

En comparaison avec les résultats précédents (2003 et 2004), les éléments majeurs ont adopté le même comportement en fonction des débits de base. Les valeurs moyennes des concentrations de ces éléments dans les écoulements de base sont restées majoritairement proches les unes des autres d'une période à l'autre (**tableau 3**). Cependant, on constate une augmentation des teneurs en potassium sur les bassins de Ara-Pont et Donga-Kolo de la

période 2003-2004 à 2005 associée à une diminution de celles du magnésium et du sodium. Un léger changement de faciès est alors observé sur les deux petits bassins mais une invariance sur le grand (Donga).

Une analyse plus fine est à réaliser pour tenter de comprendre ces changements.

Tableau 3: Comparaison des concentrations moyennes (en méq/L) des éléments majeurs dans les écoulements de base : Période 2003-2004 puis 2005 (n désigne le nombre d'échantillons prélevés en écoulement de base).

	Ara-Pont		Donga-Kolo		Donga-Pont	
	2003-2004 (n = 9)	2005 (n = 12)	2003-2004 (n = 8)	2005 (n = 11)	2003-2004 (n = 8)	2005 (n = 13)
HCO₃	0,33 ± 0,11	0,38 ± 0,03	0,55 ± 0,08	0,61 ± 0,13	0,69 ± 0,25	0,74 ± 0,09
Cl	0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,03 ± 0,02	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,00	0,03 ± 0,00
NO₃	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,00 ± 0,00
SO₄	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,00
Ca	0,13 ± 0,02	0,16 ± 0,01	0,23 ± 0,04	0,23 ± 0,03	0,30 ± 0,12	0,31 ± 0,04
Mg	0,08 ± 0,03	0,05 ± 0,01	0,17 ± 0,03	0,08 ± 0,03	0,23 ± 0,09	0,24 ± 0,04
Na	0,12 ± 0,06	0,05 ± 0,00	0,16 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,18 ± 0,06	0,19 ± 0,03
K	0,02 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,04 ± 0,02	0,14 ± 0,03	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,01

III.6.3 Le silicium dans les écoulements de base à Donga pont

Contrairement aux autres éléments majeurs, la teneur en silice demeure quasiment constante en fonction du débit de base (**figure 26**), ce qui nous paraît paradoxal. Les teneurs en silice enregistrées à la campagne 2005 sont légèrement supérieures à celles de la période 2003-2004. Il faut cependant noter le faible nombre de points en 2003-2004, ce qui constitue un handicap à une véritable comparaison des résultats d'une année à une autre.

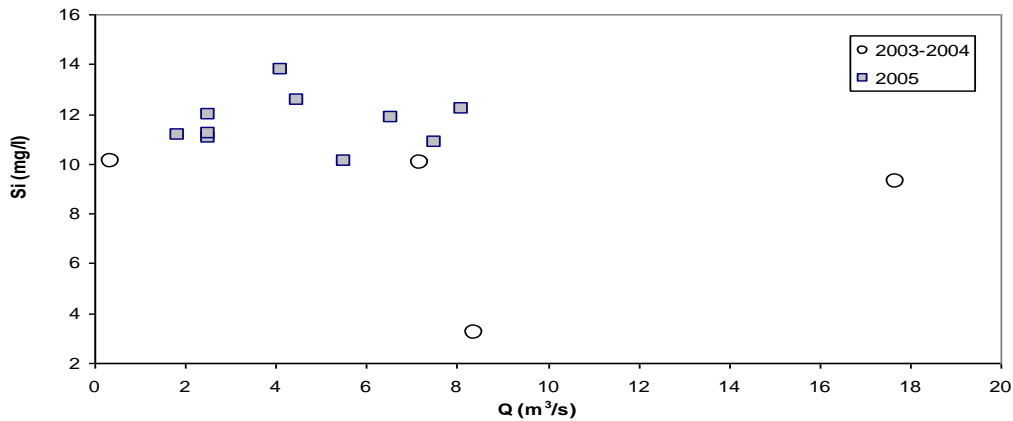


Figure 26: Teneur en Si dans les écoulements de base (Donga pont)

Ne disposant pas encore des valeurs de la silice au niveau des autres stations de notre bassin d'étude (Ara-Pont et Donga-Kolo), pour une éventuelle comparaison entre station du même bassin, nous avons observé le comportement de cet élément à Donga-Affon, la station située immédiatement en aval de l'exutoire de notre bassin et qui draine une superficie de 1330 Km². A cette station, nous constatons que la silice évolue de façon similaire aux autres éléments majeurs (**figure 27**). Sa teneur augmente avec la diminution du débit de base.

Le comportement particulier de Donga-Pont en 2005 devra être comparé à celui de Donga-Kolo et Ara-Pont lorsque les analyses des échantillons de ces stations seront réalisées.

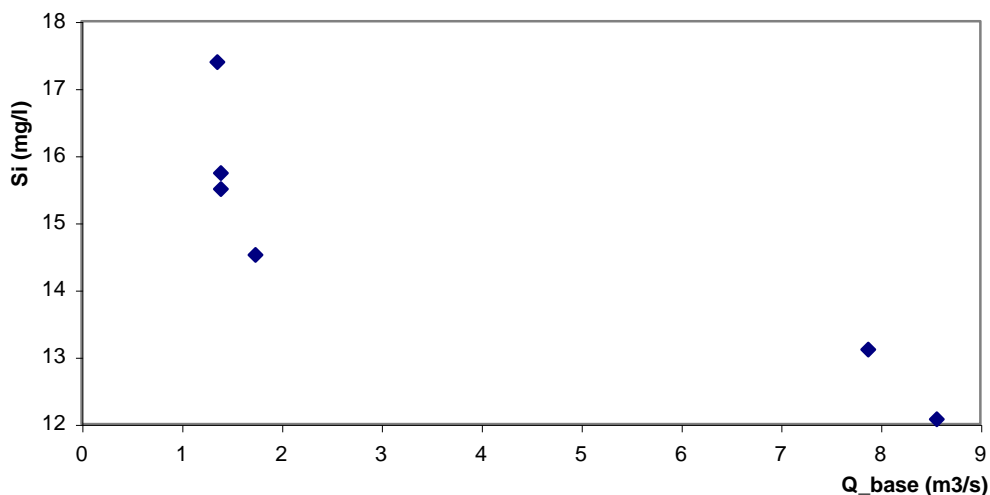


Figure 27: Silice en fonction des écoulements de base à Donga-Affon

A retenir

Globalement, nous constatons qu'il y a une augmentation de la conductivité électrique et de la teneur des éléments majeurs avec l'augmentation des débits de base. Ce phénomène pourrait être provoqué par l'évaporation partielle de l'eau des rivières. Certains auteurs

(Sklash et Farvolden, 1979) estiment que cela peut aussi être provoqué par l'apport de flux souterrains plus minéralisés. Le phénomène a été aussi mis en évidence dans le cadre d'autres études (Walling et Foster, 1975 ; Caissie *et al*, 1996).

III.6.4 Faciès des eaux pour les écoulements de base

Comme précédemment, les écoulements de base présentent aussi pour tous les sites, un faciès bicarbonaté calco-magnésien comme ceux des années précédentes. A Kolo, les eaux tendent plus vers le faciès sodi-potassique que celles de Donga et d'Ara. Cette tendance est plutôt observée les années antérieures (2002 à 2004) au niveau des eaux de la station limnimétrique de Ara-Pont.

Le diagramme des cations montre que les éléments Ca et Mg présente l'ordre d'enrichissement (selon les stations) suivant : Donga-Kolo < Ara-Pont < Donga-Pont. Par contre, au cours des années antérieures, l'ordre adopté par ces mêmes éléments est : Ara-Pont < Donga-Kolo < Donga-Pont, donc un enrichissement progressif d'amont en aval, ce qui semble plus logique.

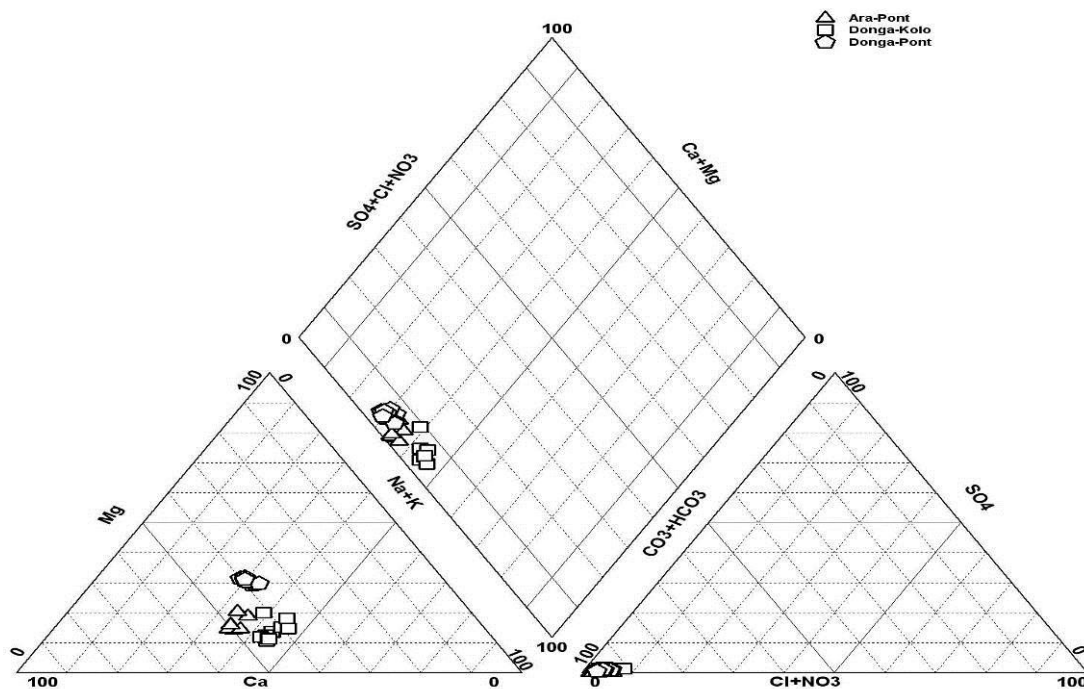


Figure 28: Diagramme de Piper pour les écoulements de base aux trois stations hydrométriques de la Donga.

TROISIEME PARTIE: ETUDE DES ECOULEMENTS DE LA CAMPAGNE 2006

I. Protocole d'échantillonnage.

Au cours de la campagne de l'été 2006, en parallèle aux mesures ponctuelles effectuées par les différentes équipes de techniciens de l'IRD, des échantillonnages de crues ont été aussi effectués et de façon rigoureuse à toutes les stations hydrométriques du bassin de la Donga, durant toute la saison pluvieuse. Nous avons ainsi procédé à l'échantillonnage des crues à la station hydrométrique de Donga-Kolo dont nous présenterons exclusivement les résultats dans cette partie du rapport, les données des autres stations n'étant pas pour le moment disponibles. A titre de rappel, la station est composée d'une échelle de crue, d'un limnigraphe et d'un conductimètre automatique. Nous nous sommes installés dans le hameau du nom de « Al-Hamadou » situé à environ 500 mètres de la station hydrométrique. A l'annonce de chaque événement pluvieux, nous nous rendions à la station hydrométrique avec les différents matériels de prélèvement. Le premier prélèvement est effectué dès le début de la pluie. Ensuite, les autres prélèvements sont effectués durant toute la montée de l'eau, chaque fois que le niveau monte de 10 cm. Dès que le niveau commence à descendre, un prélèvement est immédiatement effectué et si l'eau continue à descendre, les prélèvements sont poursuivis à chaque fois que le niveau baisse de 10 cm. Dès lors que le niveau ne baisse pas de 10 cm pendant trois (3) heures de temps, un dernier prélèvement est effectué. Les échantillons sont prélevés dans un bocal en plastique de un (1) litre de contenance. Sur chaque bocal, les informations suivantes sont mentionnées :

- Date et heure du prélèvement
- Côte à l'échelle
- conductivité de l'eau (mesurée immédiatement après le prélèvement)
- Nom de l'opérateur.

Une partie de l'eau de chaque bocal est prélevée et filtrée dans un flacon de 250 cm³ conformément au principe décrit dans le **chapitre II.1.2 des écoulements de 2005**, la partie restante étant destinée au titrage alcalimétrique complet, visant à déterminer la teneur en ions HCO₃⁻. A la fin de la crue, tous les échantillons collectés sont envoyés à la base à Djougou pour leur conservation provisoire avant expédition. Les échantillons filtrés sont expédiés par la suite au Laboratoire d'Hydroscience Montpellier (France) pour le dosage des éléments majeurs dissous.

Les matériels utilisés pour les prélèvements dans la rivière ainsi que le mode opératoire pour la détermination du titre alcalimétrique sont indiqués respectivement en **annexe 4 et 5**

II. Présentation des résultats

Les résultats présentés ici ne sont pas exhaustifs. Les données actuellement disponibles sur les échantillons collectés ne sont que :

- Les débits interpolés à partir de la courbe de tarage de la station.
- La conductivité électrique (CE)
- La teneur en bicarbonate (déterminée à partir du titre alcalimétrique).

Nos analyses porteront alors sur ces données disponibles. Les teneurs des autres éléments majeurs sont en cours de détermination au laboratoire d'Hydroscience de Montpellier. Au total, six (6) crues ont été sélectionnées pour être analysées du fait de leur importance (durée et hauteur) et de leur bonne répartition sur la saison.

Nous présenterons donc dans ce chapitre, en un premier moment, l'évolution temporelle du débit et de la conductivité à chaque crue et en un second temps, la décomposition de ces crues.

II.1. Evolution temporelle du débit et de la conductivité pendant les crues.

II.1.1 Evolution du débit

La figure 29 rend compte de l'évolution du débit pendant les différentes crues échantillonnées. Il est présenté sur le graphique, la variation des débits déduits des hauteurs lues à l'échelle limnimétrique au cours de notre échantillonnage et celle des débits déduits des hauteurs enregistrées automatiquement par le Thalimèdes (pour les 4 premières crues).

Comme souligné au chapitre **II.1.2** les sondes automatiques cessent d'enregistrer dès qu'elles sont dénoyées. Cela se traduit au niveau des graphiques par une constance des valeurs enregistrées dans le temps jusqu'à une nouvelle remontée des eaux (**cf. crues du 30/07/06 et 10/08/06, figure 29**).

L'analyse des graphiques nous montre pour l'ensemble des crues, les débits déduits des hauteurs lues et ceux issus des hauteurs enregistrés de façon automatique sont très proches. Les légers décalages observés sont dus au fait que la fréquence d'enregistrement de l'appareil automatique est un plus élevée que celle que nous avons suivie lors des prélèvements. Nous pourrions alors considérer comme bonnes les valeurs de débits issues des hauteurs lues qui pourraient être utilisées sans apport préalable de corrections.

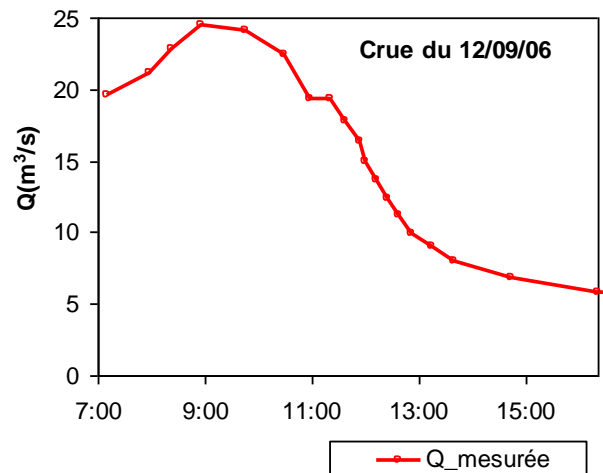
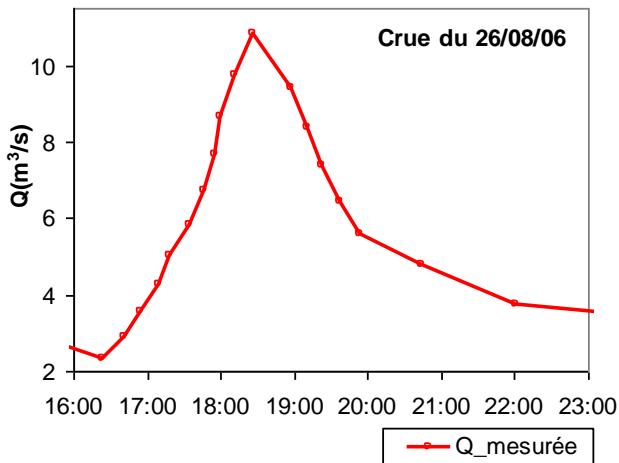
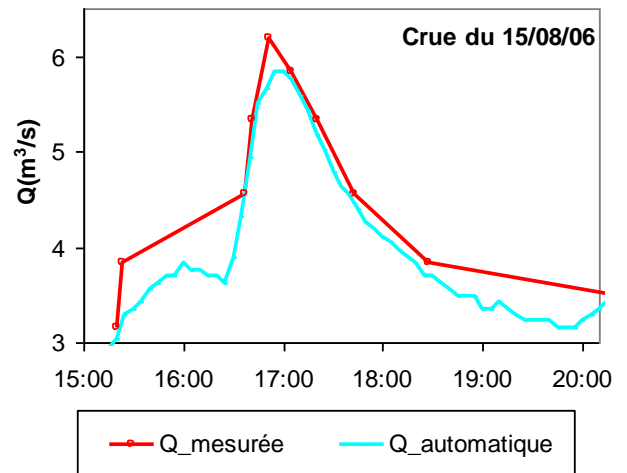
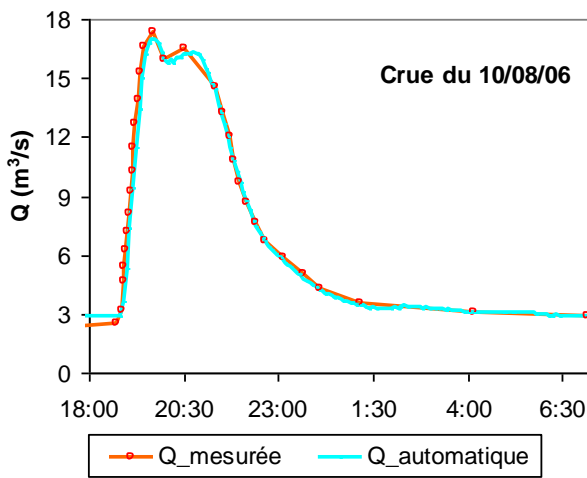
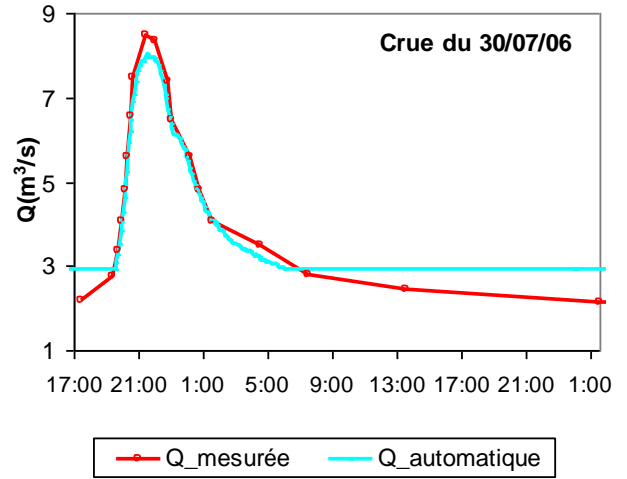
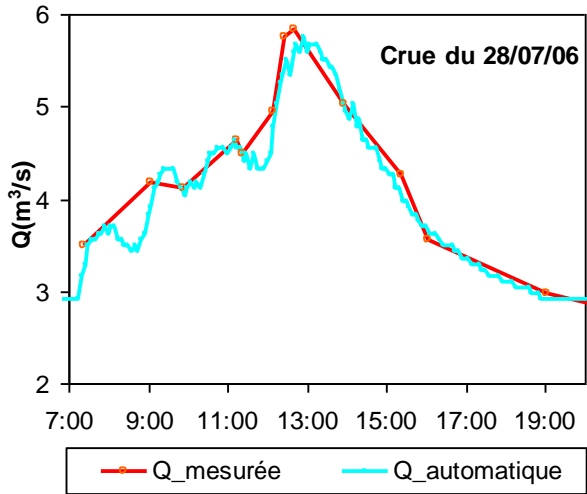


Figure 29: Evolution temporelle du débit (mesuré et automatique) au cours des crues échantillonnées à la station hydrométrique de Donga-Kolo (hiver 2006)

II.1.2 Critique des données de conductivité électrique (CE)

Dans cette partie, nous étudierons le comportement de la conductivité électrique au cours des crues échantillonnées et nous apporterons si possible des corrections aux valeurs aberrantes. La confrontation des valeurs de conductivité mesurée directement au cours de notre échantillonnage, de celles enregistrées automatiquement et de celles déduites de la teneur en bicarbonate nous permettra sans doute d'y parvenir.

En rappel, la teneur en bicarbonate a été déduite du titre alcalimétrique complet.

Pour la détermination de la CE à partir de la teneur en bicarbonate, une relation entre la CE et les teneurs en bicarbonate a été établie à partir des données de l'année 2005 à la station de Donga-Kolo (**figure 30**).

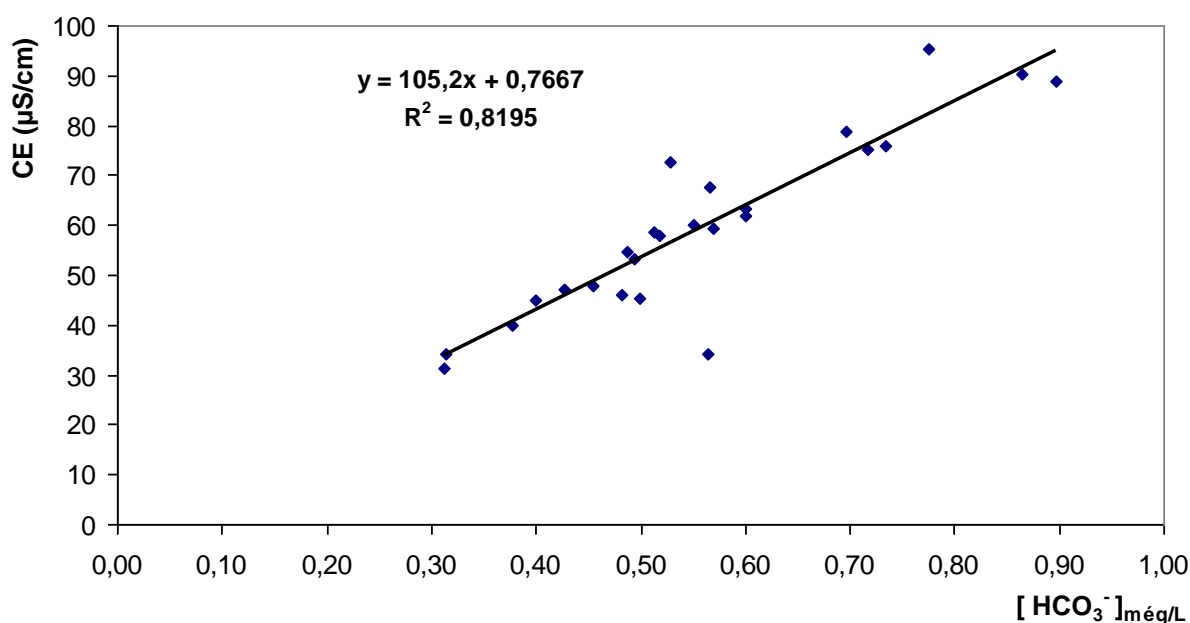


Figure 30: Relation entre la conductivité électrique (CE) mesurée manuellement et la teneur en bicarbonate (HCO₃) (en 2005)

Il s'agit d'une relation linéaire de la forme :

$$CE = 105,2 \times [HCO_3^-]_{még/l} + 0,7667 \text{ avec un coefficient de détermination } R^2 \approx 0,82.$$

A partir de cette relation, nous avons pu déduire les valeurs de conductivité, connaissant bien sûr les teneurs en bicarbonate de la campagne 2006 obtenue par titrage. Les valeurs de CE ainsi déterminées ne sont que des estimations et nous ne saurions nous y fier entièrement.

Comme le limnigraphe, le conductimètre automatique est parfois dénoyé, des lacunes se produisent. Ces lacunes se traduisent au niveau des graphiques par une chute brutale des valeurs de CE dès que la sonde est dénoyée suivie d'une constance de ces valeurs jusqu'à une autre crue. Les variations temporelles de la CE (mesuré, automatique et déduite du HCO_3^-) au cours des crues sont présentées à la **figure 31**.

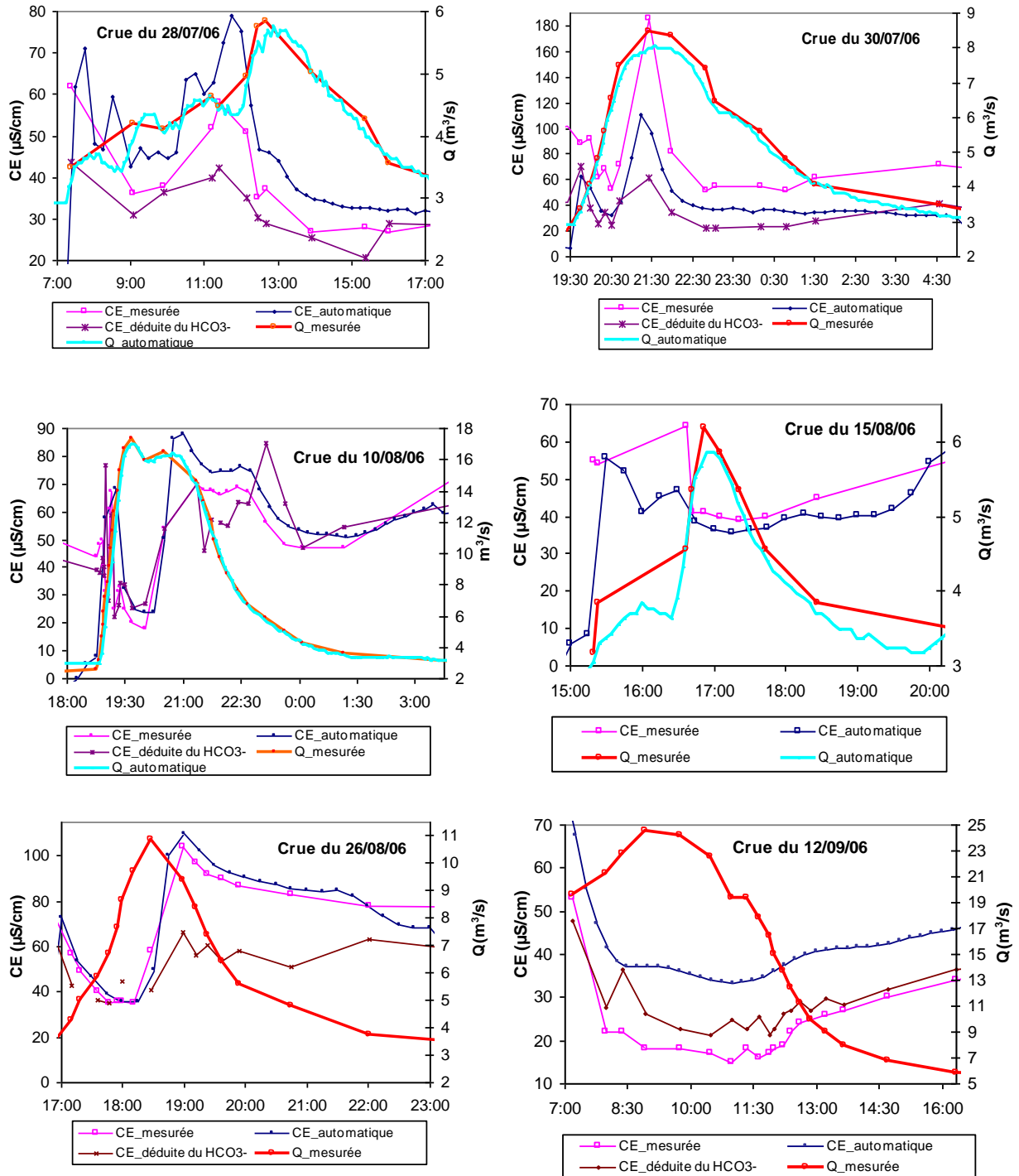


Figure 31: Evolution temporelle de la CE (mesuré, automatique et déduite du HCO_3^-) au cours des crues échantillonnées à la station hydrométrique de Donga-Kolo (hiver 2006)

L'analyse de ce graphe montre d'une part qu'en général, on assiste à une chute de la minéralisation (CE ou HCO_3) autour du maximum de la crue et ensuite à une remontée jusqu'aux valeurs rencontrées dans les écoulements de base. Pour certaines crues (28/07/06, 30/07/06, 10/08/06 et 15/08/06), un pic de conductivité est observé au début de crue. Il dépasse largement les valeurs de l'écoulement de base. Ce type de pic a été observé les années antérieures mais jamais échantillonnés. Les prélèvements réalisés cette année (campagne 2006) permettront peut-être de préciser son origine (incapacité initiale de la crue à évacuer les matières en suspension en forte quantité, apport souterrain, lessivage du lit plus ou moins à sec avant la crue).

D'autre part, ce graphe montre que les trois CE (mesurée manuellement, automatiquement et déduite de HCO_3^-) ne sont pas très proches les unes des autres mais présentent des sens de variations presque identiques. Cela suggère donc que l'un des appareils de mesure est mal étalonné. C'est notamment le cas de la crue du 30/07/06 où l'on constate que les valeurs de CE mesurée manuellement dépassent largement celles enregistrées automatiquement et celles déduites des teneurs de bicarbonates.

Afin de situer la raison de cette différence (probablement mauvais étalonnage de l'un des appareils de mesure), nous avons établi une relation entre les deux groupes de valeurs à savoir la CE automatique et la CE mesurée pour l'ensemble des crues (**figure 32**). L'analyse du graphique révèle une variation singulière des valeurs automatiques en fonction des valeurs mesurées, ceci seulement à la crue du 30/07/06. Il en ressort qu'il y a un mauvais étalonnage de l'un des appareils de mesure. Les valeurs mises en cause sont celles mesurées manuellement car précisément lors de crue du 30/07/06, le conductimètre manuel habituellement utilisé est tombé en panne et remplacé par un autre, ce dernier étant sans doute mal réglé. Ce qui réconforte surtout cette hypothèse est que pour cette même crue, les valeurs de CE automatiques et celles de CE déduite du bicarbonate sont bien proches les unes des autres (**figure 31**). Pour cette crue, les valeurs automatiques de CE enregistrées sont donc considérées plus proches de la réalité et elles seront utilisées pour la suite, notamment lors de la décomposition des crues. Pour les autres crues, les valeurs mesurées manuellement seront utilisées car elles sont proches de celles enregistrées automatiquement.

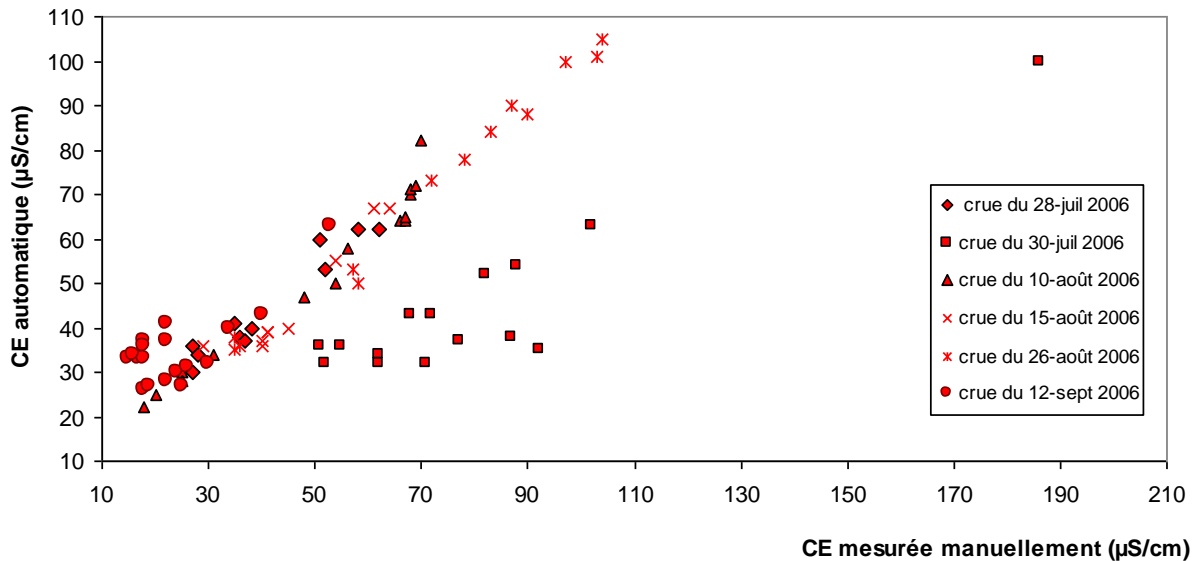


Figure 32: Variation de la CE automatique en fonction de la CE mesurée manuellement pour les crues échantillonnées

II.2 Décomposition des crues

Dans cette partie, il s'agira de quantifier la part respective de chaque composante (ruissellement rapide sur surface saturée et flux de subsurface) de l'écoulement de surface. Hewlett et Hibbert (1967) avaient avancé l'idée de l'« effet piston » pour expliquer la contribution des eaux souterraines à l'écoulement rapide de crue. Ils suggèrent que l'eau « nouvelle » de pluie qui pénètre dans le sol chasse l'eau « pré existante » dans la matrice poreuse du sol. Ceci libère au ruisseau, un volume d'eau équivalent au volume d'eau infiltrée. Plusieurs approches (hydrologique, hydrodynamique et chimique) sont utilisées. Dans le cas présent, seules les méthodes chimiques seront utilisées.

II.2.1 Approche méthodologique et traceurs utilisés

Le principe fondamental est la conception d'un modèle de mélange d'eau d'origines diverses à la base de la formation des eaux de surface. Dans le cas spécifique du bassin de la Donga, le mélange (Q_t) à l'exutoire est fondé sur un modèle à deux composantes : Q_r , la contribution du ruissellement rapide (sur surface saturée ou hortonien) et Q_l , la contribution de l'écoulement lent (flux de subsurface) (Kamagaté, 2006). Ces deux composantes sont donc les inconnus du modèle. Sur la base des deux compartiments de l'écoulement, un seul traceur chimique (i) est requis pour la simulation. En se fondant sur la conservation des masses d'eaux et de traceurs nous avons les expressions suivantes :

$$Q_t = Q_r + Q_l$$

$$C_t^i(t) \times Q_t = C_r^i \times Q_r + C_l^i \times Q_l \quad \text{Il vient donc :}$$

$$Q_l = Q_t \cdot \frac{(C_t^i - C_r^i)}{(C_l^i - C_r^i)} \quad \text{Et} \quad Q_r = Q_t - Q_l$$

où $C_t^i(t)$, C_r^i , C_l^i sont respectivement la valeur du traceur i à l'exutoire à la date t , la valeur du traceur i dans le ruissellement rapide et sa valeur dans l'écoulement lent.

Cependant, l'application du modèle doit répondre à diverses hypothèses:

- La teneur du traceur chimique dans l'épisode pluvieux considéré doit être significativement différente de celle de la rivière avant l'événement pluvieux,
- la teneur du traceur chimique de l'averse ne présente pas de variations spatio-temporelles,
- La composition chimique des réservoirs souterrains reste constante au cours de la crue,
- La composition chimique des écoulements de base est significativement proche de celle des eaux souterraines,

En réalité, la satisfaction de ces quatre hypothèses n'est pas toujours aisée pour plusieurs raisons. Dans notre contexte, les trois premières hypothèses sont proches de la réalité mais la dernière est remise en cause car les signatures chimiques des écoulements de base sont très distinctes de celles des nappes profondes mais plutôt proches de celles des nappes de subsurface (Kamagaté et al; 2005). Elle est donc applicable aux eaux de subsurface peu minéralisées.

Pour la présente étude, nous nous contenterons de l'utilisation de deux traceurs à savoir: la conductivité électrique (CE) et le bicarbonate qui sont les seuls actuellement disponibles pour les échantillons collectés.

- La CE pourrait être utilisée comme traceur géochimique du fait des écarts entre les valeurs qu'elle présente au niveau des différents réservoirs du bassin; Les caractéristiques de la composante de subsurface sont proches de celles des écoulements de base (Kamagaté, 2006). Pour ce traceur, les éléments à intégrer dans le modèle se présente comme suit:

- $C_r = CE$ des pluies.

- $C_l = CE$ des écoulements de base.

Signalons qu'à la campagne 2006, les analyses de pluie n'étant pas prêtes, nous utiliserons les données antérieures (Moyenne de CE des pluies de 2002 à 2004), tenant compte de l'hypothèse (b) ci-dessus. Les valeurs des écoulements de base (C_I) seront celles de l'année 2005, les variations des caractéristiques des écoulements de base d'une année à une autre n'étant pas très significatives.

- Le bicarbonate, quant à lui apparaît comme l'une des espèces chimiques majeures dissoutes indiquées pour le traçage des compartiments de l'écoulement total aussi à cause de la nette discrimination qu'il crée entre les eaux de surface et de la nappe souterraine superficielle ; et aussi un élément de discrimination des différents réservoirs (Kamagaté, 2006). Pour l'utilisation de ce traceur dans la décomposition des crues, on considèrera :

C_r = concentration moyenne en bicarbonate dans les pluies pour la période 2002 à 2004.

C_I = concentration moyenne en bicarbonate dans les écoulements de base (pour l'année 2005).

Les valeurs caractéristiques (C_r et C_I) retenues pour les deux traceurs (CE et HCO_3) utilisés dans la décomposition des crues sont résumées dans le **tableau 3**

Tableau 4: Valeurs caractéristiques des différents traceurs utilisées pour la décomposition des crues

Compartiments	Traceurs	
	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	HCO_3 (mg/l)
Pluie (C_r): (moyenne 2002 à 2004)	$10,5 \pm 2,0$	$0,49 \pm 0,12$
Écoulement de base (C_I): (campagne 2005)	$56,7 \pm 9,7$	$32,66 \pm 4,43$

II.2.2 Résultats obtenus

Comme énoncé précédemment, les traceurs utilisés sont le bicarbonate et la conductivité électrique (CE). La **figure 33** montre l'ensemble des fluctuations des contributions du réservoir souterrain superficiel, désigné ici par Q_L , obtenues à partir de ces deux traceurs pour chacune des 6 crues, à la station de Donga-Kolo. Par ailleurs, le volume

total écoulé ainsi que les volumes lents simulés à la base des deux traceurs utilisés (CE et le bicarbonate) ont été aussi calculés et présentés au **tableau 5**

Tableau 5 : Contribution de l'écoulement de subsurface à l'écoulement superficiel

Crues échantillonnées	Volume total (m ³)	Volume lent (m ³)		Contribution du volume lent en %	
		Simulation avec la CE	Simulation avec HCO ₃	Simulation avec la CE	Simulation avec HCO ₃
Crue du 28/07/06	21 898	13 335	10 827	61	49
Crue du 30/07/06	91 664	79 053	69 757	86	76
Crue du 10/08/06	60 609	64 862	31 133	107?	51
Crue du 15/08/06	19 402	31 796	2 321	164?	12
Crue du 26/08/06	63 260	62 182	46 405	98	73
Crue du 12/09/06	23 050	6 642	11 349	29	49

L'analyse de la figure et du tableau montre qu'il y a une grande variabilité des résultats de simulation selon le traceur. Pour l'ensemble des crues, nous constatons que le flux lent simulé à partir de la CE présente des valeurs plus élevées que celui simulé à partir du HCO₃⁻ sauf à la crue du 12/09/06. On note parfois un flux lent simulé qui dépasse le flux total. C'est le cas des crues du 10/08/06 et du 15/08/06 où la contribution du flux lent simulé à la base de la CE est supérieur à 100 % car durant ces crues, la conductivité mesurée dépasse largement à des moments, la valeur du pôle lent fixé à 56 µS/cm. Ce phénomène pourrait être attribué à une incapacité de la crue à évacuer les matières en suspension, en forte quantité, qui provoquent une hausse anormale de la CE. Cette hausse de la CE se répercute sur la valeur simulée du pôle souterrain.

En moyenne, la contribution du flux de subsurface est de 91% avec la simulation à base de la CE et de 51 % à base du bicarbonate. Au vu de ces résultats, nous pouvons dire qu'il y a une contribution prépondérante de l'écoulement lent provenant de la nappe de subsurface aux écoulements de surface en 2006. Ces résultats sont similaires à ceux de Kamagaté (2006) qui avait constaté qu'il eu une contribution de 68 % du réservoir superficiel à l'écoulement de surface en 2003 et de 83 % en 2004.

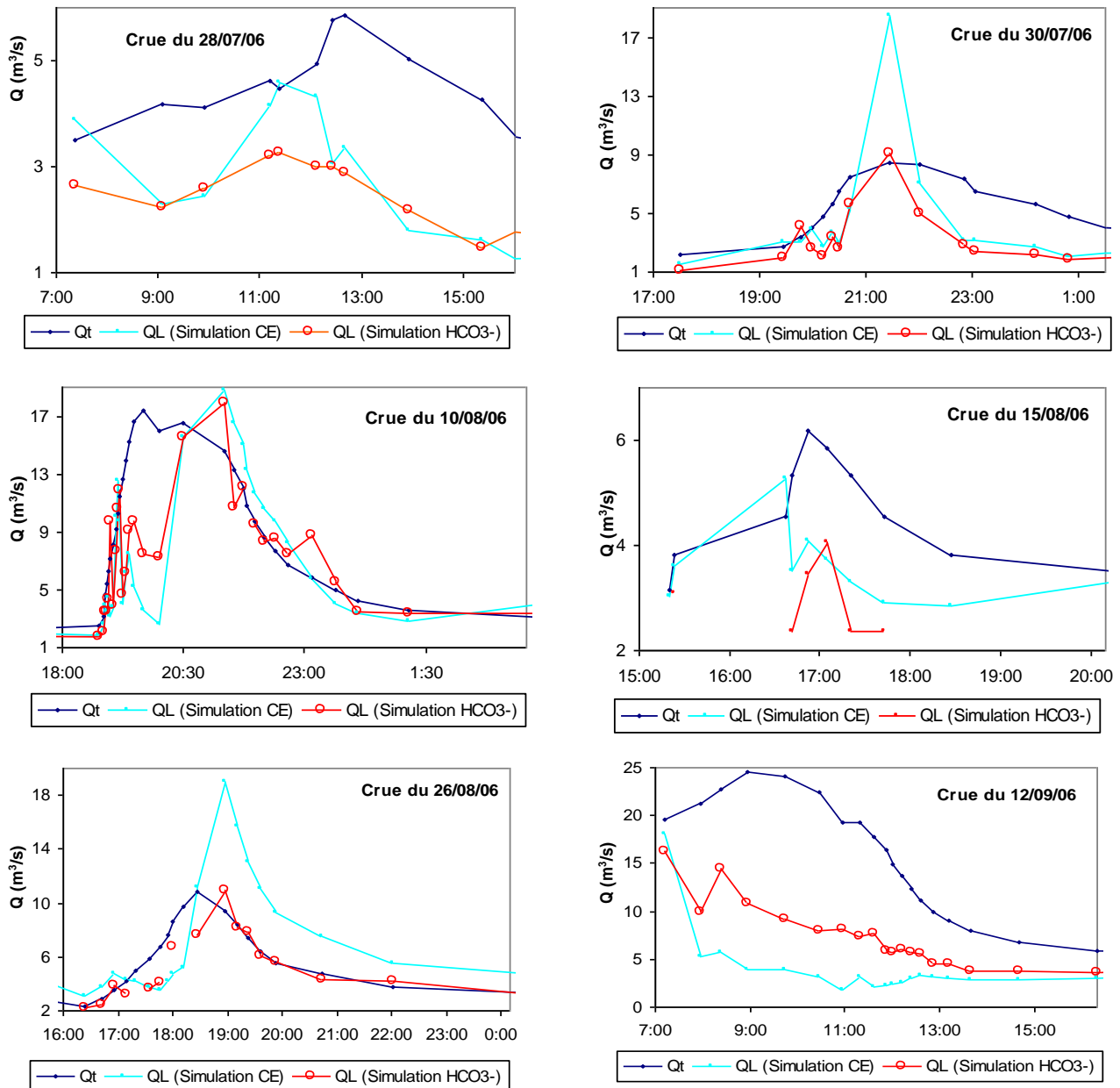


Figure 33: Contribution de l'écoulement souterrain superficiel (flux de subsurface) aux écoulements pendant les crues (Hivernage 2006)

Cependant la confiance que l'on peut accorder aux calculs du modèle doit être limitée. Plusieurs sources d'erreurs peuvent affecter ces résultats (Kamagaté, 2006):

- La variation spatio-temporelle de la composition chimique dans chacun des réservoirs est une importante source d'imprécision dans le calcul de décomposition. Chaque réservoir présente vraisemblablement une hétérogénéité spatiale. La composition chimique peut aussi varier au cours de l'évènement pluvieux du fait de l'influence des eaux de recharge,

- La répartition spatio-temporelle des compositions chimiques des précipitations et de la recharge n'est pas toujours bien connue,
- Les incertitudes analytiques sur les données chimiques peuvent également affecter les résultats,
- La composante souterraine profonde n'est pas prise en compte dans le modèle. Elle pourrait exister bien qu'ayant été négligée du fait de sa très faible implication.

Conclusion

Au terme de cette étude, nous pouvons retenir qu'en 2005, les écoulements ont véritablement commencé sur le bassin de la Donga vers la fin du mois de juin avec une crue de débit maximum de $125 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'exutoire du bassin (station hydrométrique de Donga-Pont). Il apparaît aussi qu'en 2005 les écoulements sont moindres qu'en 2003 ($150 \text{ m}^3/\text{s}$) mais plus importants qu'en 2002 et 2004 (respectivement 55 et $51 \text{ m}^3/\text{s}$). Comme observé les années antérieures, les eaux sont peu minéralisées avec un faciès bicarbonaté calco-magnésien. En écoulement de base, la minéralisation est plus prononcée et s'accroît si le débit diminue. Cette minéralisation augmente de la tête vers l'exutoire du bassin.

Suite à la décomposition hydrochimique des crues de la campagne 2006 sur la base de deux traceurs (CE et HCO_3), nous nous sommes rendu compte qu'il y a une contribution prépondérante de l'écoulement lent à l'écoulement de surface. Cependant, ces résultats de simulation ne peuvent être considérés qu'avec des réserves. En effet, la décomposition a été faite sur un modèle de mélange à deux pôles comme Kamagaté (2006) l'avait réalisé antérieurement. Or, il apparaît au vu de certaines crues échantillonnées en 2006, un pic de conductivité en début de crue qui dépasse largement la CE de l'écoulement lent. Une autre contribution à l'écoulement est à rechercher peut-être.

Si à l'échelle du bassin de la Donga, le faciès demeure le même depuis 2003, on observe cependant une certaine variabilité inter-annuelle de certains éléments majeurs (augmentation du potassium et diminution du magnésium) sur les deux sous-bassins à savoir Ara-Pont et Donga-Kolo.

Pour finir, nous suggérons un suivi à long terme des caractéristiques hydrochimiques des eaux de surface du bassin de la Donga, voire du pays afin de comprendre leurs variabilités inter-annuelles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Al-Droubi, A., 1976.** Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation-Modèle thermodynamique de simulation: application aux sols salés du Tchad. *Thèse de Doctorat es sciences*. Univ. Strasbourg (France), 177 pp.
- Ambroise, B., 1998.** La Dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant-Processus, Facteurs, Modèles. *Edition HGA*, Bucarest, 200P.
- Appelo, C. A. J., and Postma D., 1993.** Geochemistry, Groundwater and pollution. A. A. Balkema (ed.), *Rotterdam, Hollande*. 536p.
- Bariac, T., Millet, A., Ladouche, B., Mathieu, R., Grimaldi, C., Sarrazin, M., Hubert, P., Molicova, H., Bruckler L., Valles, V., Bertuzzi, P., Bes, B., Gaudu, J. C., Horoyan, J., Boulegue, J., Jung, F., Brunet, Y., Bonnefon, J. M., Tournebize, R., et Granier, A., 1996.** Décomposition géochimique de l'hydrogramme de crue sur un petit bassin versant guyanais (Piste Saint-Elie, Dispositif ECEREX, Orstom-CTFT, Guayane Française). IASH, 238, 249-269.
- BRGM/OBM, 1984.** Carte géologique au 1/200 000è, feuille de Djougou-Parakou-Nikki, *Office Béninoise des Mines*, Cotonou, République du Bénin.
- Caissie, D., Pollock, T., and Cunjak, R., 1996.** Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin. *J. hydrol.*, 178p.
- Chevallier, P. and Planchon O., 1993.** Hydrological processes in a small humid savanna basin. (Ivory Coast). *J. Hydrol.*, 151p.
- Chevallier, P., 1990.** Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro Borotou (Côte d'Ivoire). ORSTOM. Paris, 332 P.
- FAO, 1998.** Crop Evaporation – Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper, Rome, 56 p.

Faure, P., and Volkoff, B. 1998. Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). *Catena*, pp 281-306.

Faure, P., 1977. Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000, feuille de Djougou. ORSTOM, Paris, France.

Favreau, G., 2000. Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du Kori de Dantiandou. (sud-ouest du Niger). Thèse de doctorat, *Université de Paris XI*, 258 p.

Gremillon, P., Gonyeau, A., And Wanielista, M. 2000. Application of alternative hydrograph separation models to detect changes in flow in a watershed undergoing urban development. *Hydrol. process.*, 14, 1485-1501.

Harris, J., 2004. Contribution à l'étude du fonctionnement de la végétation au nord Bénin, suivie phénologique de trois couverts végétaux et mesures de LAI des espèces ligneuses dominantes. DESS, *Université de Créteil*, France, 84p.

Hewlett, J. D., and Hibbert, A. R., 1967. Factors affecting the reponse of small watersheds to precipitation in humid areas. In: W. E. Sopper et H. W. Lull (Eds.), *Forest Hydrology*, Pergamon, PP. 261-288.

Kamagaté, B., 2006. Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : Bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé). Thèse de doctorat, *Université de Montpellier II*, France, 257p.

Kamagaté, B., Favreau, G., Séguis, L., and Seidel, J. L., 2005. Geochemical approach of streamflow at various times scales in a tropical catchment (Benin, upper Oueme River). *Geophys. Res. Abs.*, 7, 04379.

Karambiri, H., 2003. Crues et érosion hydrique au Sahel : Etude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au Nord du Burkina-Faso. Thèse de Doctorat, *Université de Paris VI-Pierre et Marie Curie*, 341 p.

l'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B., and Triboulet, J. P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal sciences hydrologiques*, 47: 563-572.

Le Barbé, L., Alé, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., et Gualde, R., 1993. Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin. *ORSTOM, Paris*, 11. 540p.

Le Lay, M., et Galle, S., 2005. Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *Journal Sciences hydrologique*, 50, 509-524.

Lebel, T. et Vishel, T., 2005. Climat et cycle de l'eau en zone tropicale: Un problème d'échelle. *C. R. Géosci.*, 337, 29-38.

Mahé, G., et Olivry, J. C., 1999. Evaluation des apports en eau douce à l'Atlantique depuis les côtes de l'Afrique intertropicale (1951-1989). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 328,621-626.

Peugeot, C., 1995. Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant shélien. Thèse sciences, *Université de Grenoble*, 305p.

Servat, E., Paturel, J. E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouédraogo, M., Boyer, J. F., Lubes-Niel, H., Fristch, J. M., Masson, J. M., et Marieu, B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In *Water Ressources variability in Africa during the xxth century*. pp 323-337.

Sklash, M. G., and Farvolden, R. N., 1979. The role of groundwater in storm flow. *Journal Sciences hydrologique*. 43, 45-65.

Varado, N., 2004. Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin. Thèse de doctorat, *Institut National Polytechnique de Grenoble*, 319 p.

Walling, D. E., and Foster I. D. L., 1975. Variation in the natural chemical concentration of river water during flood, and the lag effect: some further comments. *Journal Sciences hydrologique.*, 26, 237-244.

Zin, I., Braud, I., Chen T., Gandola, F., Haverkamp, R., Vachaud, G., and Varado, N., 2003. A multi-level discretisation in the POWER hydrologica model, EGS-AGU-EUG joint assembly, Nice, France, 6-11 April 2003, *Geophy. Res. Abst.*, 5, 12171.

ANNEXES

Annexe1: Analyse chimiques des eaux échantillonnées pendant la campagne 2005 (Ecoulements de base en gras).

Stations hydrométriques	Nom des échantillons	Date	CE (µS/cm)	Eléments majeurs en méq/l								
				HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	
Ara-Pont	Ara 1	06/06/2005 00:00	60,4	0,536	0,025	0,000	0,009	0,155	0,135	0,080	0,150	
	Ara2	23/06/2005 00:00	37,6	0,369	0,014	0,008	0,006	0,100	0,141	0,054	0,090	
	Ara3	30/06/2005 00:00	39,9	0,402	0,021	0,000	0,000	0,162	0,068	0,049	0,082	
	Ara4	07/07/2005 00:00	21,8	0,347	0,022	0,000	0,000	0,167	0,073	0,046	0,075	
	Ara5	14/07/2005 08:32	16,4	0,320	0,009	0,001	0,000	0,085	0,116	0,043	0,063	
	Ara7	21/07/2005 00:00	18,9	0,346	0,007	0,000	0,000	0,120	0,083	0,053	0,081	
	Ara8	28/07/2005 16:43	30,1	0,341	0,005	0,000	0,000	0,113	0,067	0,042	0,061	
	Ara9	11/08/2005 10:41	37,3	0,408	0,009	0,000	0,000	0,163	0,046	0,046	0,071	
	Ara10	19/08/2005 16:02	37,4	0,424	0,007	0,000	0,000	0,172	0,056	0,046	0,073	
	Ara 11	22/08/2005 18:45	33,6	0,383	0,006	0,000	0,000	0,155	0,044	0,042	0,063	
	Ara14	24/08/2005 08:56	35,2	0,397	0,010	0,000	0,000	0,151	0,045	0,045	0,071	
	Ara15	25/08/2005 17:22	35,6	0,287	0,011	0,000	0,000	0,142	0,058	0,037	0,057	
	Ara16	02/09/2005 11:27	32,7	0,329	0,007	0,000	0,000	0,150	0,048	0,042	0,062	
	Ara17	09/09/2005 16:09	32,6	0,321	0,005	0,000	0,000	0,149	0,040	0,041	0,061	
	Ara18	14/09/2005 18:20	35,2	0,323	0,008	0,000	0,000	0,159	0,041	0,043	0,065	
	Ara19	17/09/2005 16:11	36,5	0,341	0,009	0,000	0,000	0,170	0,045	0,046	0,072	
	Ara20	22/09/2005 09:02	38,4	0,436	0,007	0,000	0,000	0,169	0,044	0,049	0,076	
	Ara21	29/09/2005 10:23	40	0,429	0,006	0,000	0,000	0,177	0,038	0,050	0,077	
	Ara22	08/10/2005 09:58	38,3	0,444	0,007	0,000	0,000	0,178	0,043	0,050	0,075	
	Ara23	23/10/2005 07:14	40,9	0,400	0,008	0,000	0,000	0,184	0,041	0,052	0,080	
	Ara24	12/11/2005 09:11	36	0,334	0,014	0,000	0,000	0,172	0,039	0,044	0,064	
	Ara25	18/11/2005 12:12	39,3	0,367	0,015	0,000	0,000	0,176	0,044	0,049	0,076	
	Donga-Kolo	Kolo 0	09/06/2005 08:33	75,3	0,718	0,031	0,010	0,018	0,161	0,245	0,135	0,192
		Kolo1	16/06/2005 00:00	88,7	0,896	0,025	0,005	0,011	0,167	0,232	0,153	0,217
		Kolo2	23/06/2005 00:00	46,2	0,482	0,017	0,016	0,010	0,098	0,175	0,077	0,106
Kolo3		30/06/2005 00:00	75,8	0,734	0,030	0,007	0,011	0,158	0,203	0,121	0,185	
Kolo4		07/07/2005 00:00	34,2	0,564	0,019	0,000	0,005	0,197	0,106	0,103	0,132	
Kolo5		14/07/2005 00:00	31,4	0,313	0,016	0,011	0,004	0,072	0,133	0,053	0,068	

	Kolo6	19/07/2005 09:08	44,8	0,400	0,01 9	0,00 5	0,00 4	0,15 4	0,09 2	0,07 2	0,09 1
	Kolo7	21/07/2005 00:00	72,7	0,528	0,09 7	0,02 2	0,03 5	0,22 4	0,16 4	0,10 7	0,14 4
	Kolo8	28/07/2005 16:15	34,2	0,315	0,01 5	0,00 3	0,00 5	0,09 5	0,10 5	0,05 7	0,07 6
	Kolo9	04/08/2005 09:33	58,8	0,513	0,02 5	0,00 0	0,00 7	0,20 2	0,06 5	0,09 4	0,12 0
	Kolo10	11/08/2005 11:10	58	0,518	0,02 3	0,00 1	0,00 6	0,20 8	0,06 6	0,09 5	0,11 9
	Kolo11	18/08/2005 17:38	62	0,600	0,02 4	0,00 0	0,00 7	0,22 3	0,07 2	0,10 1	0,12 8
	Kolo12	25/08/2005 16:49	40,1	0,377	0,01 4	0,00 0	0,00 4	0,15 5	0,08 1	0,06 1	0,07 7
	Kolo13	27/08/2005 08:20	47,3	0,428	0,01 6	0,00 4	0,00 4	0,18 0	0,06 4	0,07 6	0,09 5
	Kolo14	01/09/2005 17:15	53,3	0,493	0,01 9	0,00 0	0,00 4	0,20 2	0,04 8	0,08 8	0,10 8
	Kolo15	09/09/2005 16:53	47,8	0,454	0,01 9	0,00 1	0,00 4	0,19 2	0,05 0	0,07 7	0,09 4
	Kolo16	16/09/2005 09:56	54,8	0,487	0,02 1	0,00 0	0,00 5	0,20 3	0,05 7	0,08 7	0,10 9
	Kolo17	17/09/2005 17:40	45,5	0,500	0,02 3	0,00 0	0,00 6	0,21 7	0,05 7	0,08 9	0,11 2
	Kolo18	22/09/2005 00:00	59,4	0,570	0,02 9	0,00 0	0,00 8	0,21 6	0,07 5	0,09 6	0,12 0
	Kolo19	29/09/2005 11:57	67,7	0,565	0,03 1	0,00 0	0,00 8	0,24 4	0,06 3	0,10 8	0,13 4
	Kolo20	08/10/2005 10:49	60,2	0,551	0,03 5	0,01 2	0,00 8	0,23 3	0,11 4	0,09 9	0,12 1
	Kolo21	23/10/2005 09:09	63,3	0,600	0,01 7	0,00 0	0,00 4	0,23 3	0,05 9	0,10 3	0,12 9
	Kolo22	12/11/2005 13:25	78,8	0,696	0,02 5	0,00 0	0,01 1	0,26 4	0,10 0	0,12 4	0,17 1
	Kolo23	16/11/2005 09:55	95,2	0,775	0,02 2	0,00 0	0,01 1	0,27 3	0,10 3	0,14 1	0,18 3
	Kolo24	18/11/2005 00:00	90,3	0,865	0,03 3	0,00 0	0,01 3	0,29 0	0,14 1	0,14 7	0,19 7
Donga-Pont	DON 1	16/06/2005 00:00	84	0,723	0,03 8	0,01 8	0,01 6	0,37 2	0,27 3	0,10 7	0,11 9
	DON 2	23/06/2005 00:00	42,8	0,651	0,04 1	0,01 4	0,01 3	0,34 3	0,25 0	0,11 4	0,09 4
	DON 3	30/06/2005 00:00	46	0,374	0,02 7	0,02 9	0,01 0	0,21 9	0,14 8	0,07 4	0,07 2
	DON 4	07/07/2005 00:00	39,3	0,656	0,04 0	0,00 0	0,01 4	0,31 4	0,22 4	0,12 8	0,08 2
	DON 5	14/07/2005 00:00	20	0,257	0,00 8	0,01 6	0,00 4	0,09 7	0,06 7	0,02 4	0,05 2
	DON 6	20/07/2005 09:40	57	0,672	0,03 0	0,00 8	0,00 8	0,24 4	0,18 5	0,14 5	0,05 7
	DON 7	21/07/2005 00:00	25,5	0,534	0,02 2	0,00 5	0,00 5	0,20 0	0,14 7	0,11 9	0,05 3
	DON 8	28/07/2005 09:47	38,3	0,703	0,02 5	0,00 0	0,00 5	0,29 4	0,23 0	0,16 8	0,04 1
	DON 9	04/08/2005 12:09	64,3	0,651	0,02 7	0,00 0	0,00 6	0,26 7	0,20 7	0,16 1	0,04 0
	DON 10	06/08/2005 15:37	70	0,675	0,03 2	0,00 6	0,00 7	0,28 9	0,22 8	0,18 4	0,03 6
	DON 11	11/08/2005 14:09	71,1	0,774	0,02 8	0,00 4	0,00 6	0,29 6	0,23 1	0,18 6	0,06 7
	DON 12	18/08/2005 10:10	80,4	0,706	0,02 7	0,00 2	0,00 6	0,33 0	0,26 2	0,21 2	0,04 0
	DON 13	20/08/2005 16:48	71,7	0,878	0,02 6	0,00 1	0,00 7	0,37 5	0,29 1	0,23 0	0,06 4
	DON 14	25/08/2005 08:39	68,5	0,682	0,03 0	0,00 0	0,00 7	0,27 5	0,21 8	0,18 9	0,04 0
	DON 15	31/08/2005 11:00	66,2	0,665	0,02 7	0,00 0	0,00 9	0,26 8	0,21 6	0,19 6	0,03 6
	DON 16	01/09/2005 08:59	67,3	0,706	0,02 3	0,00 0	0,00 6	0,27 3	0,22 2	0,20 5	0,03 1
	DON 17	10/09/2005 09:17	65	0,619	0,02 5	0,00 2	0,00 6	0,26 0	0,20 9	0,18 7	0,03 2

DON 18	18/09/2005 08:47	81	0,785	0,03 0	0,00 1	0,00 7	0,33 8	0,27 7	0,22 0	0,03 5
DON 19	21/09/2005 16:10	61,5	0,718	0,03 1	0,00 2	0,01 0	0,30 4	0,23 4	0,22 7	0,06 1
DON 20	24/09/2005 17:31	80,4	0,803	0,02 7	0,00 0	0,00 6	0,32 4	0,25 2	0,23 1	0,04 5
DON 21	08/10/2005 12:55	64,3	0,657	0,02 4	0,00 0	0,00 7	0,26 1	0,20 9	0,19 4	0,04 0
DON 22	22/10/2005 11:05	84,5	0,919	0,02 4	0,00 2	0,00 6	0,35 9	0,28 6	0,24 0	0,03 2
DON 23	12/11/2005 17:24	129,8	1,377	0,02 4	0,00 4	0,01 2	0,60 1	0,47 7	0,30 5	0,05 1
DON 24	18/11/2005 00:00	139,4	1,509	0,02 1	0,00 3	0,01 2	0,64 2	0,50 5	0,32 3	0,05 3
DON 25	22/11/2005 09:15	136,7	1,586	0,02 2	0,00 2	0,01 3	0,66 9	0,52 1	0,34 1	0,05 6

Annexes 2: Concentration de la silice à Donga-Pont en 2005 (écoulement de base en gras)

Date	Si (mg/l)	Date	Si (mg/l)
16/6/05	10,62	25/8/05	11,03
23/6/05	10,81	31/8/05	10,99
30/6/05	15,52	1/9/05	11,38
7/7/05	10,75	10/9/05	11,39
14/7/05	5,27	18/9/05	11,04
20/7/05	12,20	21/9/05	9,32
21/7/05	10,38	24/9/05	11,25
28/7/05	13,79	8/10/05	11,83
4/8/05	10,87	22/10/05	11,19
6/8/05	10,10	12/11/05	10,94
11/8/05	12,57	18/11/05	10,71
18/8/05	11,99	22/11/05	10,92
20/8/05	11,15		

Annexe 3: Crues échantillonnées en 2006 et conductivités correspondantes

Crues	Date	Heure	Hauteur Echelle (en cm)		Conductivité en ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
			basse	haute		
Crue du 28/07/06	28/07/2006	07:23	39		62	
		09:05	49		36	
		09:54	48		38	
		11:13	55		52	
		11:24	53		58	
		12:08	59		51	
		12:26	69		35	
		12:40	70		37	
		13:56	60		27	
		15:22	50		28	
		16:02	40		27	
		19:02	31		31	
		22:05	26		32	
		29/07/2006	04:02	17		36
			16:02	14		43
Crue du 30/07/06	30/07/2006	17:30	17		71	
		19:27	27		102	
		19:46	37		88	
		19:59	47		92	
		20:11	57		62	
		20:22	67		68	
		20:30	78		52	
		20:42	88		72	
		21:26	98		186	
		22:00	97		82	
		22:50	87		87	
		23:04	77		77	
		31/07/2006	00:11	67		55
			00:49	57		51
			01:32	47		62
04:34	39			71		
07:34	28			61		
13:34	22			47		
01/08/2006	01:34	16		42		
Crue du 10/08/06	10/08/2006	18:45	24		44	
		18:51	34		48	
		18:54	55		50	
		18:56	65		40	
		18:58	75		43	
		19:00	85		31	
		19:03	95	70	32	
		19:07		80	61	
		19:09		90	67	
		19:11		100	50	
		19:14		110	25	
		19:19		120	31	
		19:22		130	33	
		19:28		140	25	

		19:41		145	20
		20:00		135	18
		20:30		139	54
		21:20		125	70
		21:32		115	68
		21:44		105	68
		21:48		95	67
		21:58		85	66
		22:10		75	67
		22:24		65	69
		22:40		55	67
		23:09		45	56
		23:39	60	35	48
	11/08/2006	00:06	50		47
		01:10	40		47
		04:10	32		73
		07:10	29		69
Crue du 15/08/06	15/08/2006	15:20	34		55
		15:23	44		54
		16:37	54		64
		16:42	64		41
		16:52	74		41
		17:05	70		40
		17:21	64		29
		17:43	54		40
		18:27	44		45
		21:27	36		61
	16/08/2006	00:17	40		41
		06:27	29		49
Crue du 26/08/06	26/08/2006	16:23	20		72
		16:42	30		70
		16:55	40		72
		17:10	50		57
		17:19	60		49
		17:35	70		40
		17:46	80		35
		17:55	90		36
		18:00	100	70	36
		18:11		80	35
		18:27		90	58
		18:42		87	103
		18:58		77	104
		19:11		67	97
		19:22		57	92
		19:37		47	90
		19:54		37	87
		20:44		27	83
		22:01	43	17	78
	27/08/2006	01:10	34		77
		04:01	26		69
		10:01	25		77
		22:01	23		72

Annexe 4 : Liste des matériels utilisés pour l'échantillonnage de crue (2006)

- Une cantine pour transporter tout le matériel.
- Des flacons de 1,5 l pour contenir l'eau brute prélevée.
- Des flacons de type Nalgène de 250 ml pour contenir l'eau filtrée
- Des boîtes de filtre (0.45 μ m de porosité).
- Un porte-filtre
- Des seringues servant à prélever l'eau pour la filtration.
- Une pissette
- De l'eau distillée.
- Un chronomètre pour indiquer les temps de prélèvement.
- Deux lampes torches pour les prélèvements de nuits.
- Un multimètre et à défaut un conductimètre.
- Une puisette pour puiser l'eau depuis le pont.
- Un seau d'eau

Annexe 5 : Mode opératoire pour la mesure du Titre Alcalimétrique Complet (TAC)

Le matériel utilisé pour la mesure est le suivant :

- Un titrateur digital
- cartouches d'acide sulfurique (0.16N),
- PhenolPhtalein en petits sachets
- Bromcresol en petits sachets
- Eprouvette graduée en plastique de 100 ml
- Flacons en verre (Erlenmeyer) de 125 et 250 ml
- Coupe-ongle
- Pissette
- Eau distillée

1/ Préparation

- Se laver les mains.
- Disposer l'ensemble avec les bouteilles de prélèvement dans un endroit bien éclairé à la lumière du jour.
- Descendre le piston du titrateur jusqu'à que l'on sente une résistance

2/ Mesure

- Rincer l'éprouvette graduée et le flacon en verre de 125 ml avec l'eau de la bouteille de prélèvement
- Verser dans l'éprouvette graduée 25 ml d'eau de la bouteille de prélèvement
- Reverser ensuite ces 25 ml dans le petit flacon en verre
- Rajouter avec la pissette 75 ml d'eau distillée pour atteindre 100 ml.
- Tourner la molette du titrateur jusqu'à voir apparaître une goutte à l'extrémité du petit tube recourbé.
- Remettre à 0 le compteur du titrateur
- Déchirer un sachet de Phenolphthalein, verser la poudre, puis agiter.

Cas normal	Autres cas
<p>L'eau reste transparente</p> <p>Noter 0 dans la colonne Phenolphthalein de la fiche d'analyse</p>	<p>L'eau devient rose</p> <p>Verser de l'acide avec le titrateur jusqu'à ce que l'eau devienne transparente</p> <p>Noter la valeur du compteur dans la colonne Phenolphthalein de la fiche d'analyse</p>

Ne pas remettre à 0 le compteur du titrateur.

-Déchirer un sachet de Bromcresol, verser la poudre dans le flacon en verre, puis agiter :
L'eau devient bleu-vert.

-Verser de l'acide avec le titrateur tout en agitant **jusqu'à ce que l'eau passe à un rose pâle.**

NB : Le petit tube du titrateur doit rester dans l'eau et servir d'agitateur.

-Tourner la molette très doucement en agitant constamment dès qu'un léger voile rose se forme au bout du petit tube. Ceci afin de ne pas atteindre le rose vif.

-Lorsque le rose pâle est atteint, noter la valeur du compteur dans la colonne Bromcresol de la fiche d'analyse.

-Mettre à 0 le compteur, verser de l'eau distillée sur le petit tube recourbé.

Vider le flacon

-Passer au prélèvement suivant (recommencer la procédure de 2/ Mesure)

3/ Nettoyage final

Après avoir analysé la dernière bouteille de prélèvement :

-Rincer à l'eau distillée l'éprouvette et le flacon.

-Ramener le piston du titrateur à sa position initiale. Mettre à 0 le compteur

-Enlever le petit tube recourbé de l'extrémité de la cartouche. Le rincer sous l'eau distillée, souffler dedans et entreposer dans la caisse plastique.

-Fermer la cartouche.

-Retirer la cartouche du titrateur sans forcer.

-Ranger tout le matériel.

Exemple de feuille de mesure du Titre alcalimétrique

Site	Date Heure Prélèvement	Date Heure Analyse	Opérateur	Compteur Phenol Phtalein	Compteur Bromcrésol
Site1					
Site 2					
....					
Site 20					

4/ Conversion du TAC en concentration en bicarbonate (en méq/l)

Pour déterminer la concentration en bicarbonate de l'échantillon en méq/l, on procède de la manière suivante :

Le chiffre (C_1) lu au compteur Bromcrésol est multiplié par un coefficient α qui est fonction de la normalité de la solution d'acide sulfurique ayant servie au dosage et du volume totale de solution. Le *tableau ci-dessous* donne les différentes valeurs de α en fonction de ces paramètres. On obtient un chiffre C_2 tel que $C_2 = \alpha C_1$. Le chiffre C_2 est par la suite divisé par

50 pour obtenir la concentration exprimée en méq/l de l'échantillon en bicarbonate ; soit

$$[HCO_3^-] = \frac{C_2}{50} = \frac{\alpha C1}{50}$$

Tableau : Différentes valeurs de α

Echantillons (Volume en ml)	Normalité (H ₂ SO ₄)	coefficient α
100	0,16	0,1
25	0,16	0,4
100	1,6	1,0
50	1,6	2,0
20	1,6	5,0
10	1,6	10,0

Source : Manuel d'utilisation du « Digital Titrator »

(Hach Company)