

**UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

Discipline : Météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement.

Formation Doctorale : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental.

École Doctorale : TERRE, EAU et ESPACE.

présentée et soutenue publiquement

par

Bamory KAMAGATÉ

Le 17 octobre 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)**

JURY

M. Michel DESBORDES	Professeur	Université de Montpellier II
M. Christian LEDUC	Directeur de Recherche	IRD-Tunis, Directeur de thèse
M. Yves TRAVI	Professeur	Université d'Avignon, Rapporteur
M. Pascal AFFATON	Maître de Conférence	CEREGE Aix-en-Provence, Rapporteur
M. Luc SÉGUIIS	Chargé de Recherche	IRD-Cotonou, Co-directeur de thèse
M. Guillaume FAVREAU	Chargé de Recherche	IRD-Tunis

REMERCIEMENTS

Au moment où j'apporte les ultimes corrections à ce mémoire de thèse, je tiens à exprimer mes profonds remerciements à tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté soutien et réconfort.

Je suis très reconnaissant envers les techniciennes du laboratoire HydroSciences Montpellier, en l'occurrence Sandra Van-Exter et Marie-Ange Cordier, pour les analyses physico-chimiques et surtout pour leur gentillesse. Je n'oublie pas les techniciens du laboratoire de Biogéochimie des Milieux Continentaux (BIOMCO) de l'INRA INAPG de Grignon dirigé par Thierry Bariac, pour les analyses isotopiques. Je remercie Christophe Peugeot et Luc Le Barbé pour la coordination et la mise en forme des données hydrométriques et pluviométriques. Une part importante de l'acquisition de ces données de terrain a été assurée par Simon Afouda, Marc Arjounin, Jean Michel Bouchez, Florent Jacquin, Fred Malinur et Théophile Ouani, tous techniciens de l'IRD au Bénin. Qu'ils en soient remerciés. Il en est de même pour la Direction de l'Hydraulique de Djougou (MMEH, Bénin) qui a permis l'accès aux infrastructures hydrauliques du bassin. L'accueil et la participation des habitants sont également remerciés. Je n'oublie pas la très importante contribution apportée par Pascal AFFATON pour une meilleure compréhension du contexte géologique de la zone et pour avoir accepté d'être rapporteur.

À Luc SÉGUI, mon encadreur scientifique, j'adresse toute ma gratitude pour l'encadrement de cette thèse et surtout pour le savoir qu'il m'a transmis. J'ose croire qu'il sait combien je le remercie pour tout ce qu'il a fait pour moi. À Guillaume Favreau et Jean Luc Seidel, j'exprime toute ma reconnaissance pour le co-encadrement du travail. Je remercie particulièrement Guillaume Favreau pour son soutien constant et surtout pour ses initiatives de formation parallèle qui m'ont été très fructueuses. Je ne peux oublier Christian LEDUC, mon directeur de thèse pour avoir accepté la direction de ma thèse. Je

le remercie surtout pour son encouragement à finir un travail commencé...
J'exprime toute ma gratitude à l'ensemble des membres de mon jury de thèse.

Ce travail a été rendu possible par une bourse de thèse de la Côte d'Ivoire et du Département de Soutien et Formation de l'IRD, par les financements institutionnels des programmes français ECCO-PNRH (2003-2004), ORE (2002-2010) ainsi que par le soutien du projet européen AMMA-EU (2005-2009). Je ne peux oublier le soutien toujours spontané de ma famille.

Que les conclusions de cette thèse servent de base de référence pour les travaux à venir de façon générale et pour les chercheurs béninois en particulier.

TABLE DES MATIÈRES

I- INTRODUCTION	11
I.1- Contexte scientifique	13
I.2- Problématique et unités hydrologiques d'étude	14
I.3- Objectif et démarche scientifique	16
II- MILIEU D'ÉTUDE	19
II.1- Importance socio-économique de la ressource en eau	21
II.2- Relief, hydrographie et végétation	23
II.3- Manteau pédologique et substratum géologique.....	25
II.3.1- Manteau pédologique	25
II.3.2- Substratum géologique.....	26
II.3.2.1- Observations de terrain et analyse de roches	28
II.3.2.2- Minéralogie par diffraction rayons X	30
II.3.3- Conclusion	31
II.4- Contexte hydrogéologique.....	32
II.4.1- Limite verticale du réservoir	32
II.4.2- Limite latérale du réservoir	35
II.4.3- Paramètres hydrodynamiques.....	36
II.4.4- Conclusion	38
III – FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE.....	39
III.1- Objectifs	41
III.2- Pluviométrie	41
III.2.1- Réseau pluviographique	41
III.2.2- Acquisition des données.....	42
III.2.3- Distribution spatio-temporelle	43
III.2.4- Conclusion	49
III.3- Évapotranspiration	49
III.3.1- Données historiques	49
III.3.2- Données récentes	50
III.3.2.1- Station météorologique et paramètres mesurés	50
III.3.2.2- Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	51
III.3.2.3- Lames évapotranspirées	52
III.3.3- Conclusion	54
III.4- Piézométrie.....	54
III.4.1- Échelle du bassin	54
III.4.1.1- Réseau de mesure	54
III.4.1.2- Acquisition des données	56
III.4.1.3- Critiques et représentativité des relevés	57
III.4.1.4- Fluctuations piézométriques.....	59
III.4.1.5- Relation pluie-recharge-vidange	62
III.4.2- Échelle du versant	65
III.4.2.1- Stations de mesure.....	65

III.4.2.2- Acquisition des données	66
III.4.2.3- Critiques et représentativité des relevés	66
III.4.2.4- Fluctuations piézométriques.....	67
III.4.2.5- Relation pluie-recharge-vidange	68
III.4.3- Conclusion	70
III.5- Hydrométrie.....	70
III.5.1- Réseau hydrométrique.....	70
III.5.2- Acquisition et critique des données	71
III.5.3- Lames écoulées	71
III.5.4- Écoulement de base et tarissement	77
III.5.5- Conclusion	79
III.6- Synthèse et fonctionnement hydrologique	80
IV- FONCTIONNEMENT HYDROGÉOCHIMIQUE.....	83
IV.1- Objectifs.....	85
IV.2- Hydrochimie.....	85
IV.2.1- Minéralisation naturelle en milieux cristallins	85
IV.2.2- Analyse des données historiques	88
IV.2.2.1- Localisation des points de mesure.....	88
IV.2.2.2- Conductivité électrique	89
IV.2.2.3- Signature des ions majeurs.....	90
IV.2.2.4- Conclusion	91
IV.2.3- Analyse des données collectées	91
IV.2.3.1- Dispositif de mesure et échantillonnage.....	91
IV.2.3.2- Méthodes et précisions analytiques.....	94
IV.2.3.3- Représentativité de l'échantillonnage	96
IV.2.3.4- Caractérisation des précipitations.....	98
IV.2.3.5- Caractérisation des réservoirs souterrains	103
IV.2.3.6- Caractérisation des écoulements de surface	134
IV.3- Géochimie isotopique	156
IV.3.1- Échantillonnage et représentativité des données	157
IV.3.2- Méthodes et précisions analytiques.....	157
IV.3.3- Caractérisation des précipitations	157
IV.3.4- Caractérisation des réservoirs souterrains	159
IV.3.5- Caractérisation des écoulements de surface	162
IV.3.6- Synthèse et compréhension des processus.....	165
IV.4- Synthèse et fonctionnement hydrogéochimique	167
IV.4.1- Spécificités hydrochimiques des compartiments hydriques	167
IV.4.2- Spécificités isotopiques des compartiments hydriques	179
V- DÉCONVOLUTION HYDROCHIMIQUE.....	181
V.1- Objectifs	183
V.2- Approche méthodologique	183
V.3- Choix des traceurs et validation du modèle de mélange.....	185

V.4- Résultats	187
V.4.1- Échelle de l'évènement de crue.....	187
V.4.2- Échelle des chroniques.....	194
V.5- Incertitudes et validation des résultats	195
V.5.1- Échelle de l'évènement de crue.....	196
V.5.2- Échelle des chroniques.....	198
V.6- Conclusion	200
VI- SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE	201
VI.1- Fonctionnement hydrologique	203
VI.2- Fonctionnement hydrogéochimique	203
VI.3- Synthèse des résultats	204
VI.4- Contribution à la compréhension des processus et à l'amélioration des modèles hydrologiques	204
VI.5- Perspectives	206
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	209
LISTES DES FIGURES	221
LISTE DES TABLEAUX	235
ANNEXES	239

I- INTRODUCTION

I.1- Contexte scientifique

En Afrique de l'ouest sous régime de mousson, la sécheresse sévère en cours depuis le début des années 70 et caractérisée par une diminution de l'ordre de 20% à 30% de la pluviométrie (L'Hôte *et al.*, 2002 ; Lebel et Vischel, 2005) a engendré une diminution encore plus importante des débits (Mahé et Olivry, 1999). Cette sécheresse a parfois provoqué le tarissement des rivières. De nombreux cours d'eau comme le Niger ont accusé une baisse importante de leurs écoulements. Au centre du Bénin, sur la zone d'étude, le déficit des écoulements de l'ordre de 40% correspond à une diminution de la pluviométrie de 15 à 20% (Lebel et Vischel, 2005).

Cette relation non linéaire entre pluie et débit, ainsi que sa variabilité spatio-temporelle, est encore mal comprise à l'échelle régionale ; les principales études ont jusqu'à présent été menées à partir de données hydrodynamiques acquises sur de grands bassins versants (de l'ordre de 10 000 à 100 000 km²) par des approches indirectes ou conceptuelles (tests statistiques ; calculs de coefficients de tarissement ; Mahé et Olivry, 1999 ; Mahé *et al.*, 2000). L'explication avancée est que la diminution relativement plus importante des débits trouve son origine dans une réduction durable des apports en eau souterraine. La validation de cette hypothèse nécessiterait une analyse des processus physiques à une échelle comparable à celle des observations de surface (données piézométriques disponibles sur plusieurs milliers de km², sur la période pluridécennale des observations de débits). Mais des éléments de réponse peuvent cependant être apportés par la caractérisation des processus physiques affectant les différents réservoirs hydriques d'un bassin versant représentatif, étudié sur des années à pluviométrie et écoulement contrastés.

En zone soudano-sahélienne, les rares études existantes à fine échelle (Chevallier et Planchon, 1993 ; Peugeot *et al.*, 1997 ; Braun *et al.*, 2002 ; Séguis *et al.*, 2004) montrent que la discrimination des écoulements rend nécessaire une approche pluri-disciplinaire des différents termes du bilan. Le programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine ; <http://www.amma-international.org/>) a été initié en vue d'étudier le fonctionnement de la mousson ouest-africaine. L'un de ses buts est d'améliorer la connaissance des bilans d'eau terrestre et notamment l'impact sur la ressource en eau des changements climatiques et anthropiques. Dans le cadre de l'Observatoire de Recherche en Environnement ORE AMMA-Catch (<http://www.lthe.hmg.inpg.fr/catch>), 3 sites de méso-échelle (fig. 1) ont été instrumentés : de la zone soudanaise (la haute vallée de l'Ouémé au Bénin) à la zone sub-désertique (Gourma au Mali).

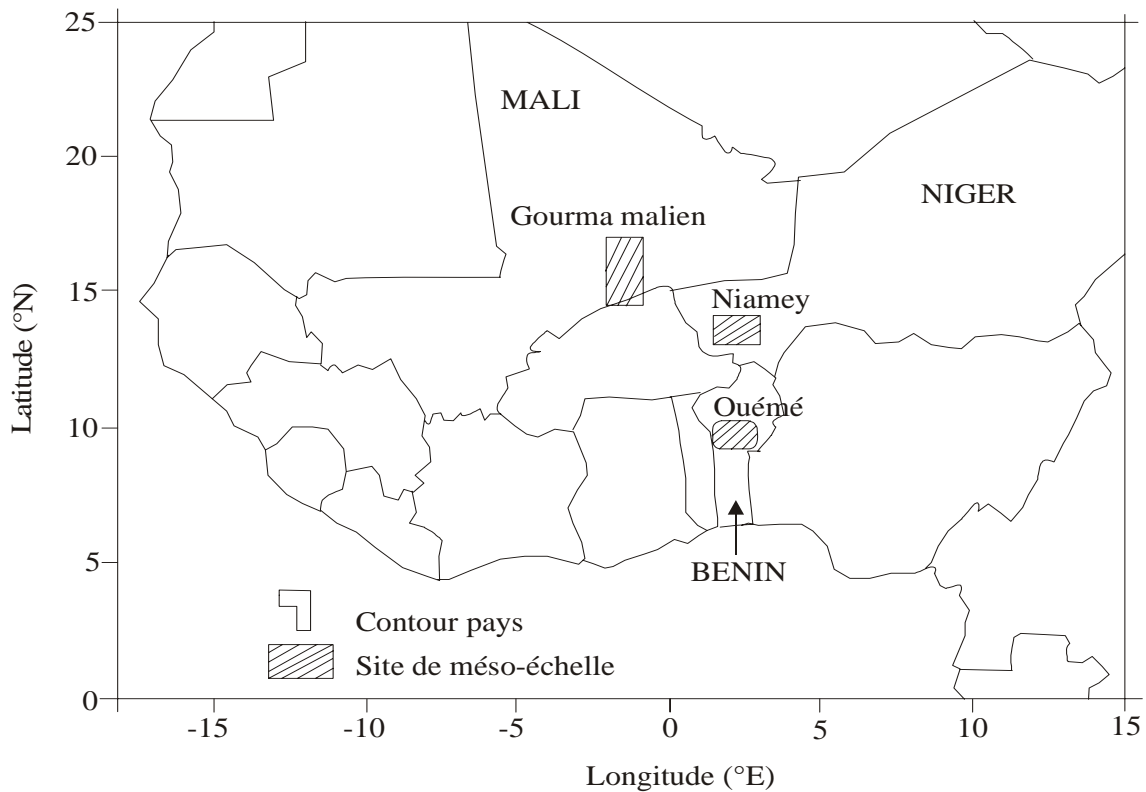


Figure 1 : Sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre du programme AMMA.

I.2- Problématique et unités hydrologiques d'étude

Contrairement aux zones sahéliennes, caractérisées par des écoulements principalement hortonien (du fait de sols peu couverts, aux surfaces encroûtées ; Casenave et Valentin, 1992) et des nappes relativement profondes avec comme principaux points de recharge le fond des vallées et les mares (Favreau, 2000), les zones soudanienne 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. Quel pourrait donc être le niveau de connexion entre le réseau hydrographique et les réservoirs souterrains en zone soudanienne?

Sur chaque site de méso-échelle (fig. 1), les processus hydrologiques sont étudiés sur un bassin versant bénéficiant de mesures intensives. Dans la zone soudanaise, le bassin versant de la Donga est le cadre de notre étude, sur l'Ouémé supérieur (fig. 2).

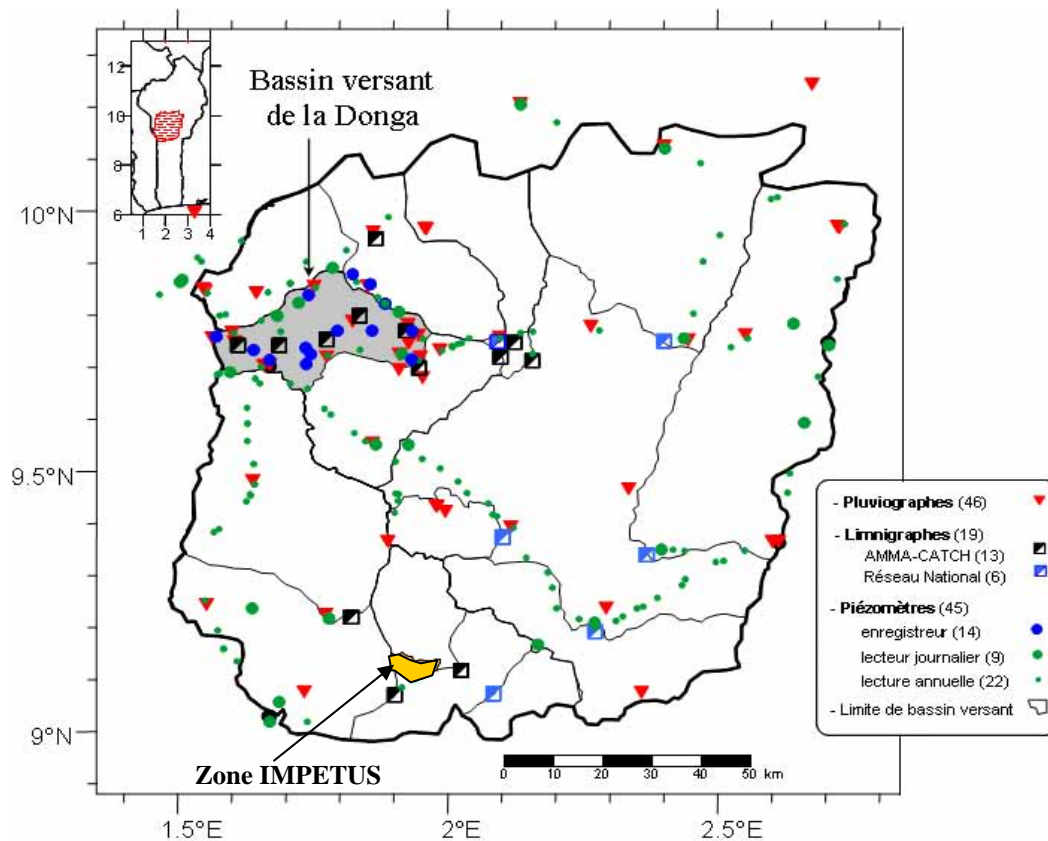


Figure 2 : Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO).

Le bassin versant de la Donga (fig. 3), situé au nord-ouest de l'observatoire hydro-météorologique de la haute vallée de l'Ouémé (OHHVO ; fig. 2), est formé d'un emboîtement de plusieurs bassins dont ceux d'Ara (13 km²) et 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.

La description des points de mesure pour chacun des termes du bilan hydrologique (réseaux pluviométrique, piézométrique, hydrométrique, station de mesure des paramètres climatiques nécessaire au calcul de l'évapotranspiration et réseau de mesures hydrogéochimiques) sera réalisée ultérieurement.

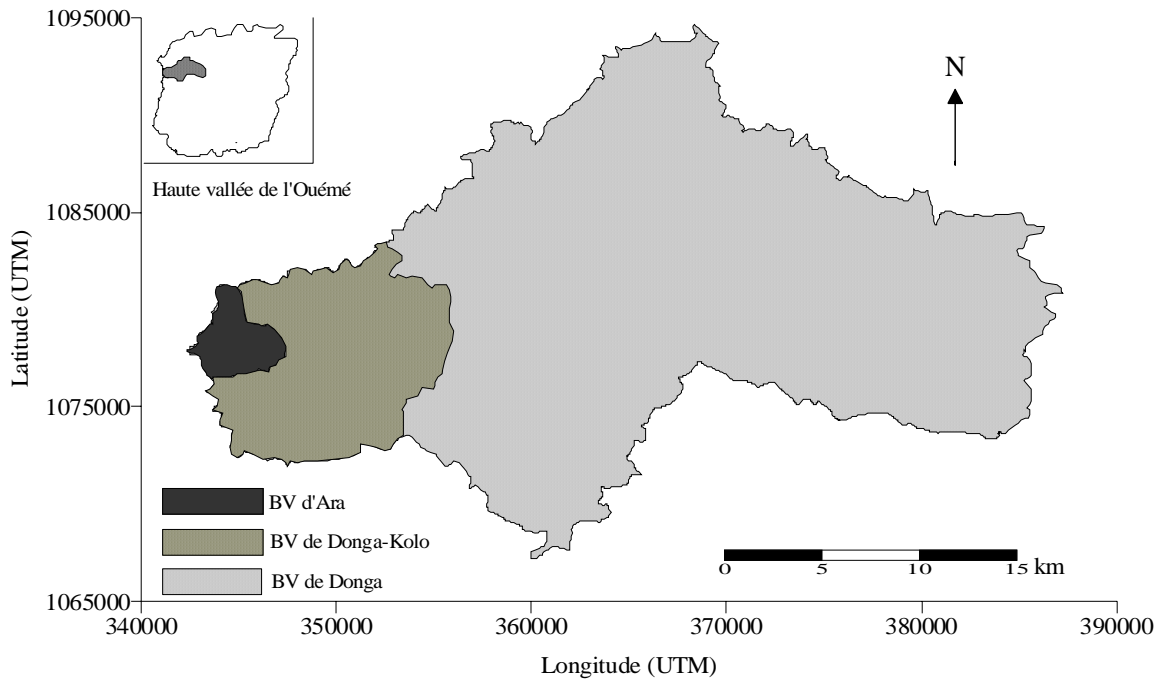


Figure 3 : Bassin versant (BV) de la Donga et ses sous-bassins considérés, Ara et Donga-Kolo.

I.3- Objectif et démarche scientifique

L'objectif essentiel du travail est de contraindre l'estimation du bilan hydrologique du bassin versant de la Donga afin de mieux caractériser et hiérarchiser les processus de production d'écoulement et les échanges de flux entre les eaux de surface et les eaux souterraines. On contribuera principalement, à partir de l'instrumentation mise en place et les données collectées sur le bassin, à la caractérisation et la quantification des composantes du bilan hydrologique. Il s'agit de mieux comprendre les processus physiques régissant le fonctionnement hydrologique du bassin à implémenter dans les modèles hydrologiques (Le Lay, 2006). La démarche adoptée porte sur trois années d'observation (2002, 2003 et 2004) et présente quatre parties :

1. la présentation du cadre physique consistant en un recueil d'informations d'ordre général (relief, hydrographie et végétation, substratum géologique, manteau pédologique et contexte hydrogéologique) nécessaires à une bonne compréhension du contexte de travail,

2. le fonctionnement hydrodynamique du bassin versant fondé sur une caractérisation hydrodynamique des principaux termes du cycle de l'eau (pluviométrie, piézométrie, évapotranspiration et hydrométrie),
3. le fonctionnement hydrogéochimique du bassin versant à partir d'une caractérisation des principaux termes du bilan hydrologique par l'utilisation de marqueurs naturels (paramètres physico-chimiques, éléments majeurs et traces, isotopes stables de l'eau),
4. la quantification à l'échelle annuelle des différents termes de l'écoulement par modélisation hydrogéochimique (déconvolution des hydrogrammes).

II- MILIEU D'ÉTUDE

II.1- Importance socio-économique de la ressource en eau

La population de la zone, estimée à environ 20 000 habitants, est essentiellement rurale. Celle-ci connaît une croissance annuelle de l'ordre de 4,9 % entre 1992 et 2002. Les activités socio-économiques, hormis la plus grande ville de la zone (la ville de Djougou), sont basées sur des cultures à vocation vivrière (mil, manioc, maïs, igname) ou de rente (coton, anacarde, fig. 4). Ces cultures agricoles sont exclusivement de type pluvial sans irrigation.



Figure 4 : Cultures d'igname et de coton (13/08/2004)

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement permanent en eau des populations de la zone. Une estimation par suivi de terrain des puisages quotidiens, effectuée en 2003 dans 4 villages représentatifs, indique une consommation domestique en eau de l'ordre de $21 \text{ l.hab}^{-1}.\text{jour}^{-1}$; cette valeur est proche de celle estimée pour l'ensemble de la haute vallée de l'Ouémé ($17 \text{ l.hab}^{-1}.\text{jour}^{-1}$; Hadjer *et al.*, 2005). Compte tenu de la population rurale du bassin de la Donga, ceci implique des prélèvements anthropiques faibles, de l'ordre de $0,2 \text{ mm.an}^{-1}$.

La ressource en eau est accessible de façon quasi permanente pour l'ensemble des communautés. La mobilisation des eaux souterraines reste donc vitale et le nombre impressionnant des ouvrages de captage (puits villageois et forages) atteste bien de leur importance socio-économique. Les puits et forages, en dehors de leur rôle quotidien sont particulièrement sollicités lors des grandes cérémonies notamment en période de fête (fête d'igname, fête de la chicote, fête du mil, tabaski, pâque), de mariage, de funérailles et même pendant les jours de marché. Ceci implique nécessairement une forte relation entre population

et points d'eau. C'est l'exemple du village de Dendougou où le port des chaussures est strictement interdit dans les périmètres de protection définis autour des puits par les villageois eux mêmes.

Le puisage domestique reste une activité exclusivement réservée aux femmes. Celles-ci accomplissent cette tâche généralement à raison de trois fois par jours. Une organisation quasi parfaite des parties de puisage, caractérisée par une discipline basée sur « l'ordre d'arrivée » appliquée par tous sous l'œil vigilant mais à distance des hommes est de règle (fig. 5). Le puisage est également favorable au développement de complicité ente femmes. C'est un lieu privilégié pour se faire des confidences qui portent généralement sur la vie de couple ou de celle de la concession voisine.



Figure 5 : Exemple d'organisation des villageoises lors du puisage de l'eau (puits de Moné et forage de Kparisi, 25/07/2003)

Des sources d'approvisionnement en eau, de moindre importance, sont également sollicitées. Ce sont notamment les eaux de rivière et marigots dont le rôle varie d'une localité à l'autre. Ces ressources, peu sollicitées pour la consommation domestique, sont souvent destinées à la lessive. Elles constituent également des lieux sacrés et d'adoration pour certaines communautés. C'est le cas du marigot *Al Hirou* dans la localité de Babayaka, qui compte tenu de sa pérennité est un véritable lieu sacré parce qu'il serait protégé par des génies.

II.2- Relief, hydrographie et végétation

Une représentation du relief et de la topographie est possible au moyen des cartes au 1/50 000e disponibles sur la zone. Mais depuis avril 2004, un modèle numérique de terrain (MNT) permet une couverture plus homogène et de bonne qualité du bassin. Il est issu de données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission 2000) utilisant la méthode d'interférométrie radar avec une résolution spatiale de 3 secondes d'arc (environ 90 m) et une précision altimétrique de 16m/10 m (absolu/relatif).

La topographie du bassin est faiblement vallonnée, avec des altitudes comprises entre 480 m à l'amont (ouest) et 330 m à l'exutoire (est) pour une pente moyenne de la rivière principale de l'ordre de $1,7 \text{ m.km}^{-1}$ (fig. 6). Le réseau hydrographique, relativement dense, est principalement drainé par des rivières généralement d'ordre 2 ou 3. La Donga a une longueur linéaire d'environ 75 km. La ville de Djougou, préfecture du département, est située à l'amont du bassin.

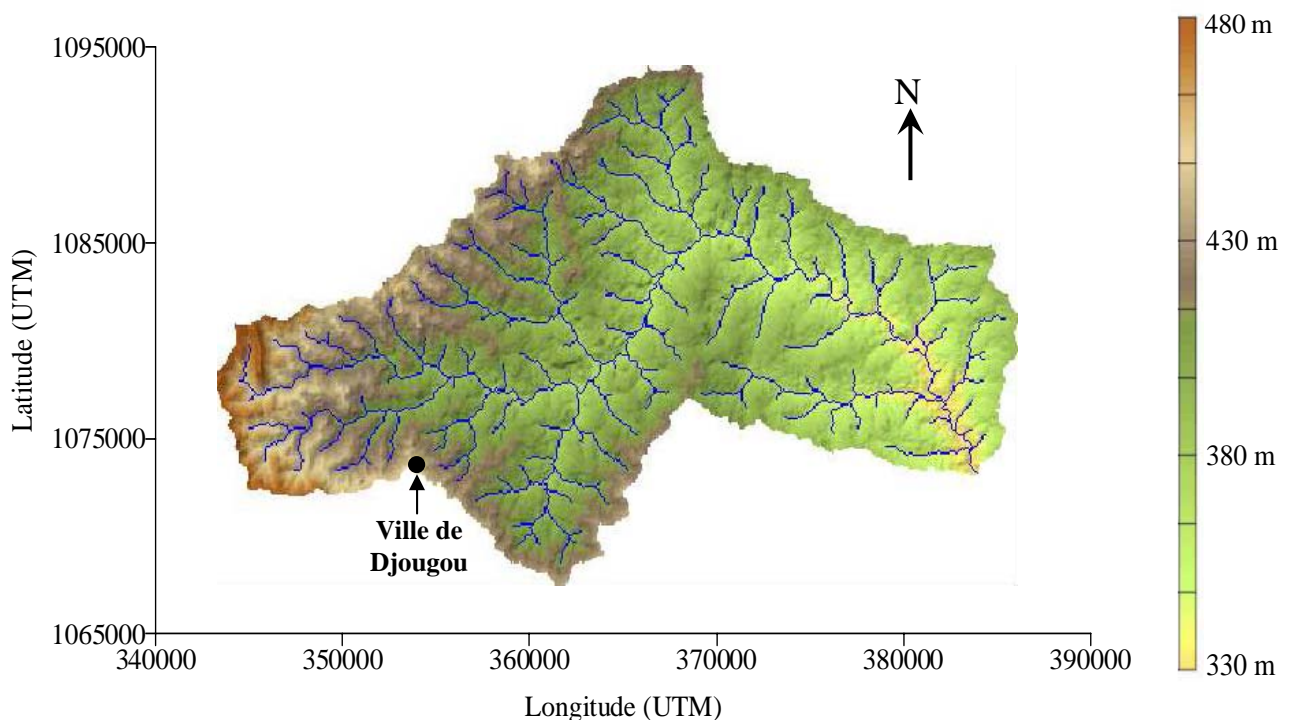


Figure 6 : Topographie et réseau hydrographique sur le bassin de la Donga (MNT issu de la mission SRTM).

La totalité des rivières du bassin présentent un régime d'intermittence (fig. 7) caractérisé par un assèchement total en saison sèche (entre novembre et avril) et une reprise des écoulements en saison humide (entre mai et octobre).



Figure 7 : Intermittence des écoulements de surface : la rivière Donga en saison sèche (février 2003) et humide (juillet 2003).

Une carte d'occupation des sols a été dressée au moyen d'images satellites SPOT et ERS en vue d'étudier la végétation (fig. 8 ; Zin *et al.*, 2003) qui a également fait l'objet d'un DESS (Harris, 2004).

La végétation apparaît 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*). 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 (*Elaies guineensis*, *Berlinia grandiflora*, *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).

Une étude encore plus détaillée menée par Zacharie Seyigona (Université Abomey Calavi, Bénin) sous la direction de Josiane Seghieri (IRD Mali) et de Christophe Peugeot (IRD Bénin) est en cours.

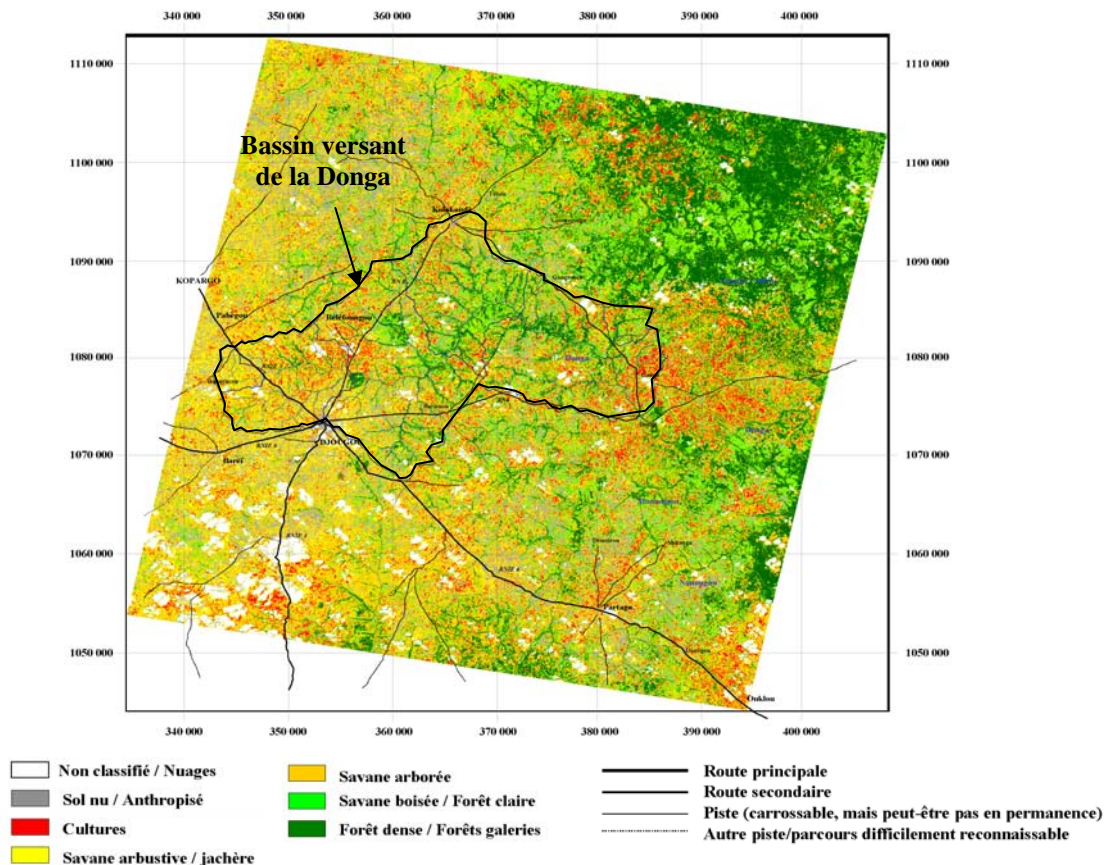


Figure 8 : Occupation des sols du bassin versant de la Donga en 2003 : classification scène SPOT du 22/10/2003 et ERS du 23/04/2003, projection UTM WGS84 (zone 31N).

II.3- Manteau pédologique et substratum géologique

Le manteau pédologique du bassin versant de la Donga repose sur un socle constitué essentiellement de formations cristallophylliennes paradérivées (Affaton, 1990).

II.3.1- Manteau pédologique

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 ferrallitiques et les sols ferrugineux régionaux tropicaux (fig. 9, Faure, 1977).

Les sols ferrallitiques (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 (faible migration des colloïdes argileux et forte migration des sesquioxydes), de sols hydromorphes (proches des sols peu lessivés, faible épaisseur, faible perméabilité) et de sols lessivés (lessivés en argile et en sesquioxydes). Dans les sols ferrugineux régionaux tropicaux, l'altération de la roche permet, pendant la saison des pluies, la libération et la concentration dans l'horizon superficiel de sels métalliques. Ces sols sont de nature variable en fonction de leur position topographique, de la nature des roches sous-jacentes ou de l'anthropisation du site. Ils se caractérisent par une altération plus forte que dans le cas des autres types de sols et par l'accumulation d'hydrates ferriques associés à très peu d'oxydes alumineux. Ils présentent également des profondeurs variables, une bonne horizontalisation des profils pédologiques, une forte présence en matière organique et un bon drainage interne. Au bas des versants, des horizons indurés y sont très souvent visibles.

II.3.2- Substratum géologique

Le bassin versant de la Donga repose sur deux unités structurales (unités structurales de la plaine du Bénin et de l'Atacora) constituées essentiellement de formations datées du Protérozoïque supérieur (carte géologique, BRGM/OBM, 1984). Outre ces deux unités, des formations superficielles d'altération très épaisses sont observées à l'extrême ouest et au centre est du bassin (fig. 10).

La majeure partie du bassin de la Donga 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 micaschistes 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 migmatites et de gneiss migmatitiques à biotite et grenat. La partie orientale du bassin est occupée par la « formation de la Donga ». À l'affleurement, cette formation laisse apparaître une alternance de gneiss fins et de leptynites à biotite et muscovite. 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 de quartzites à muscovite et la seconde est constituée de micaschistes quartzeux à muscovite.

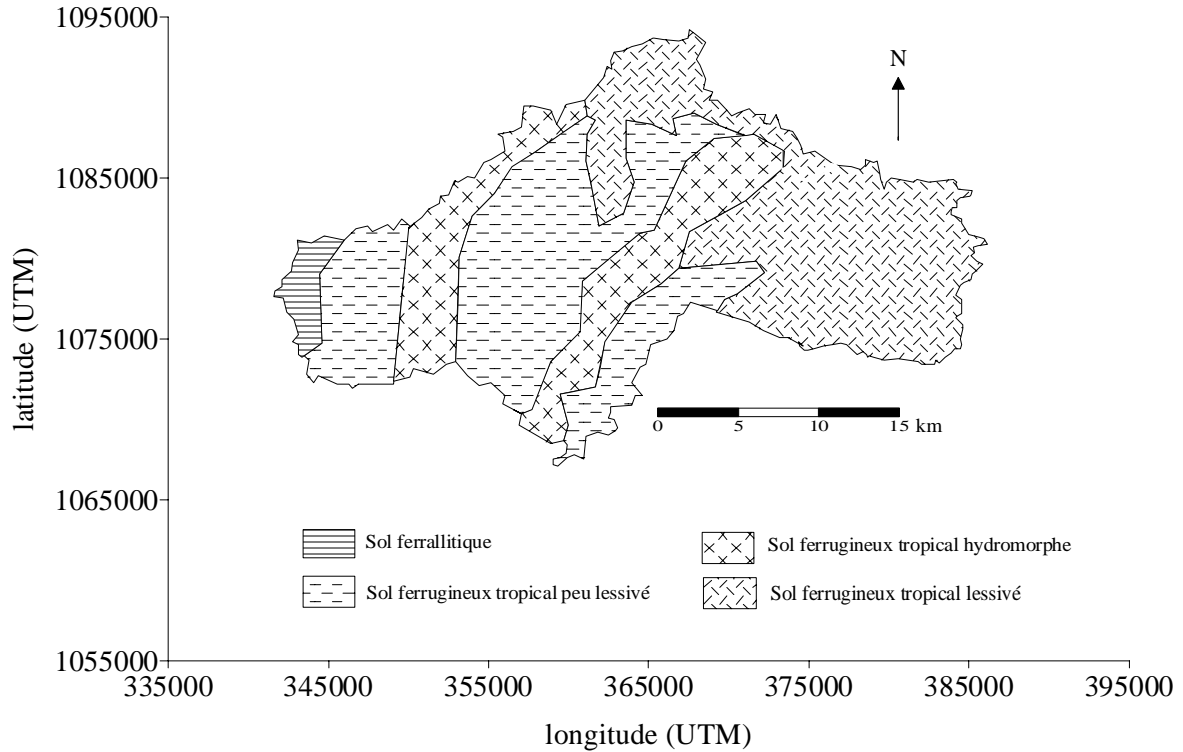


Figure 9 : Carte pédologique au 1/200 000e du bassin de la Donga (Faure, 1977).

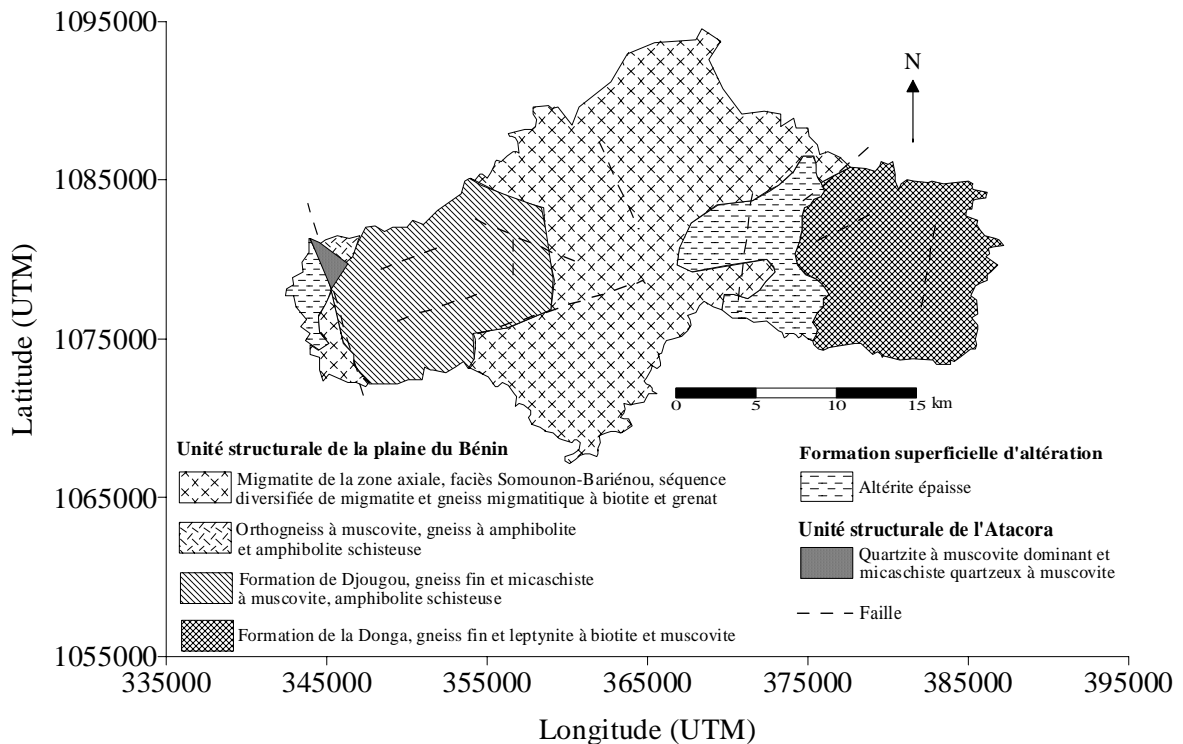


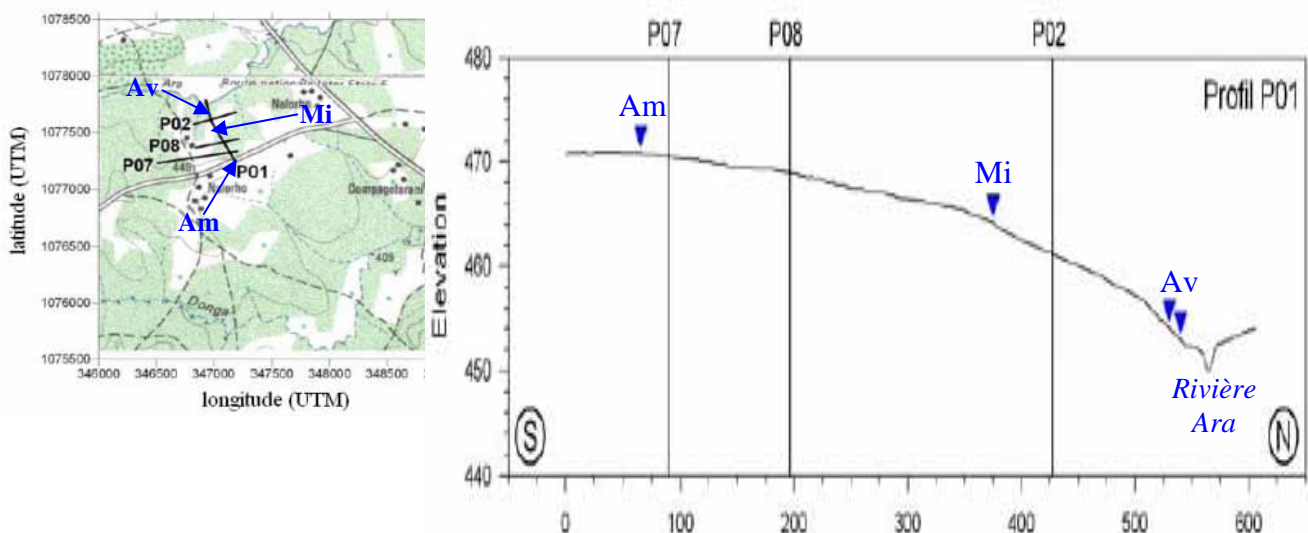
Figure 10 : Carte géologique au 1/200 000e du bassin de la Donga (BRGM/OBM, 1984).

Tout comme le manteau pédologique, le substratum géologique apparaît très hétérogène. Contrairement à ce qu'on pourrait s'attendre, aucune relation particulière ne se dégage entre la distribution spatiale des composantes de ces deux niveaux. Le manteau pédologique, même s'il provient de l'altération du substratum, apparaît donc en relative indépendance vis à vis du socle sous-jacent du point de vue de sa répartition spatiale.

II.3.2.1- Observations de terrain et analyse de roches

À la faveur d'une visite de terrain réalisée en 2003 sous la supervision de Pascal Affaton (CEREGE, Aix-en-Provence), nous avons pu vérifier à la fois la présence des formations et des faciès pétrographiques évoqués précédemment. Aussi a-t-on retenu que globalement les formations s'inscrivent dans un ensemble métamorphique hétérogène paradérivé traduisant une origine majoritairement sédimentaire des roches rencontrées.

Une description à une échelle de plus fine investigation des faciès pétrographiques a été rendue possible grâce à des observations à l'œil nu d'échantillons de roches déjà écrasées et prélevés lors de l'implantation de piézomètres sur une toposéquence expérimentale dans le bassin versant d'Ara. Les ouvrages sont forés à l'aide d'un équipement pneumatique à marteau fond de trou et les gravats en poudre correspondant à des profondeurs bien notées, ont été recueillis au fur et à mesure de la foration. La position des points de prélèvement « Amont », « Milieu » et « Aval » au droit de la ravine principale est indiquée en bleu dans la fig. 11. Chacune des stations dispose de 3 profondeurs d'investigation 2, 10 et 20 m.



Les caractéristiques verticales de la lithologie (coupes lithostratigraphiques de 0 à 20 m de profondeur) aux trois stations sont détaillées en annexe 1. La station Amont repose sur des altérites variées résultant de gneiss à muscovite, d'amphibolites, de micaschistes à 2 micas et de micaschistes à muscovite. Au contraire de la station Amont, la station Milieu présente une partie supérieure qui développe un sol peu altéré. Plus en profondeur, on y observe un complexe avec plusieurs horizons pegmatitiques privés d'horizons d'amphibolites comme constaté en Amont. La station Aval présente des horizons comparables à ceux de la station Milieu. Mais elle a la particularité de conserver des niveaux quartzitiques ou aplitiques. En dessous donc d'un sol toujours latéritique et argilo-sableux, une alternance de gneiss plus ou moins altérés et de micaschistes avec une forte dominance de muscovite constitue la lithologie de la zone en accord avec les informations précédentes tirées de la carte géologique (fig. 10). D'un point de vue hydrogéologique, le sol dont l'épaisseur semble variable d'une station à une autre pourrait constituer un réservoir transitoire assimilable à la zone non saturée. Le gneiss et le micaschiste, dont le degré d'altération semble identique, pourraient constituer un réservoir. En outre, le fond des forages atteint la partie altérée du socle, mais ne semble jamais atteindre le substratum sain. Ceci réduit l'étude des réservoirs à la seule caractérisation des réservoirs d'altérites, les réservoirs de socle n'ayant donc pas été captés.

D'un point de vue spatial, les caractéristiques géologiques sont résumées dans le tableau 1. La profondeur du sol semble se réduire d'amont en aval du versant. Si l'alternance de gneiss et de micaschiste est observée aux trois stations, l'agencement vertical des niveaux géologiques apparaît très distinct. Des niveaux amphibolitiques observés en Amont ne le sont pas ailleurs, tout comme des niveaux pegmatitiques au Milieu et aplitiques en Aval. Ceci traduit une forte variabilité lithologique de la zone, même à une échelle de plus fine investigation.

Stations	0 à 20 m de profondeur
Amont	altérites de gneiss à muscovite, d'amphibolites, de micaschistes à 2 micas et de micaschistes à muscovite
Milieu	sol peu altéré, horizon pegmatitique privé d'amphibolites
Aval	quelque peu identique à la station Milieu mais conserve des niveaux quartzitiques ou aplitiques

Tableau 1 : Spécificités géologiques de chaque site (Amont, Milieu et Aval).

II.3.2.2- Minéralogie par diffraction rayons X

Une description des signatures minéralogiques du substratum est également rendue possible grâce à des analyses par diffractométrie rayons X effectuées sur les mêmes échantillons ayant servi de base à l'identification lithologique précédente. Au total, 26 échantillons ont été analysés en avril 2004 au CEREGE (Aix-en-Provence). Quatre grands groupes de minéraux se sont dégagés en fonction des fréquences d'apparition dans les roches (annexe 2). Nous définissons cette fréquence comme étant le nombre de fois où le minéral est observé sur l'ensemble des analyses.

- I. Le premier groupe (I) est formé par l'albite, la kaolinite, la muscovite et le quartz. Ces minéraux sont observés dans la quasi totalité des roches analysées.
- II. Le second groupe (II) est constitué par la biotite, le clinocllore, le microcline et la montmorillonite. Ceux-ci ont une fréquence d'apparition plus faible que celle des minéraux du premier groupe (1 fois sur 2).
- III. Le troisième groupe (III) est formé par des minéraux de très faible fréquence d'apparition. Ce sont la goethite et la hornblende magnésienne.
- IV. Le quatrième groupe (IV) est constitué de minéraux "rares" observés une seule fois. Ce sont la montronite, l'orthoclase, la riebeckite magnésienne, la saponite et la sanidine.

D'un point de vue hydrochimique, les formules chimiques des minéraux identifiés indiquent théoriquement tous les éléments susceptibles de passer en solution : Si, Al, Na, K, Mg, Ca, Fe et F (annexe 2). Cette identification est bien cohérente avec celle obtenue par rayons X (tableau 2). On observe d'une part les éléments constitutifs des formations superficielles tropicales (Si, Al et Fe) et d'autre part les cations relevant de la dissolution des roches endogènes (Ca, Mg, Na et K).

La distribution verticale des éléments chimiques rencontrés est exprimée sous forme de fréquence d'apparition dans une tranche de profondeur (tableau 2). Elle est définie comme étant le nombre de fois où l'élément est observé sur l'ensemble des analyses. Les fréquences d'apparition sont variables d'un élément à un autre en fonction de la profondeur. Cette variabilité est d'un intérêt hydrochimique capital. Elle guidera à la compréhension de la chimie des eaux. Si, Al et Fe sont plus fréquents en surface parce qu'ils constituent les éléments principaux des altérites. Ils disparaissent en dernier au cours des processus

d'altération. Leur passage en solution est à la base de la formation de la latérite (Si) et de la bauxite (Al). Mg et K restent constants avec la profondeur. Ceci témoigne de l'équilibre permanent entre l'eau et les argiles de néoformation, produites par altération des feldspaths. Les éléments Ca et Na semblent alterner au fur à mesure de la profondeur. La forte mobilité de Ca favorise son passage rapide en solution, notamment dans la zone non saturée, pouvant être identifiée à l'horizon 2 m. Ceci pourrait expliquer la faible fréquence d'apparition de Ca dans les roches superficielles. Aussi selon les résultats de l'analyse minéralogique, les seuls minéraux amphibolitiques susceptibles de libérer des ions Ca (notamment la magnésiohornblende, annexe 2) sont observés à des profondeurs supérieures à 10 m.

Profondeur (m)	Éléments chimiques disponibles							
	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	F
2	++++	++++	++++	++	+++	+++	++++	+++
10	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
20	++	++	+++	++++	+++	+++	+++	+++

Tableau 2 : Fréquence d'apparition des éléments chimiques dans les roches analysées par diffractométrie rayons X en fonction de la profondeur.

II.3.3- Conclusion

Les formations métamorphiques rencontrées présentent une forte variabilité aussi bien verticale que latérale. Cette variabilité se caractérise par une alternance de gneiss, micaschistes et amphibolites.

Les roches sont dominées par des minéraux feldspathiques, des argiles de néoformation et de rares amphiboles. La conséquence hydrochimique de cette disposition pétrographique et minéralogique sera évaluée à travers les concentrations en produits cationiques d'altération que sont Si, Al, Ca, Mg, K et Na (le fer n'ayant pas été analysé). La distribution verticale de ces éléments sera également déterminante dans l'identification et la caractérisation chimique des différents compartiments des réservoirs souterrains.

La couverture pédologique du substratum est essentiellement constituée de sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés et hydromorphes avec une forte capacité de drainage interne du fait d'une altération importante.

II.4- Contexte hydrogéologique

La zone d'étude se situe sur le socle cristallin décrit précédemment. Ces formations ne renfermeraient donc pas d'aquifère continu du fait de l'absence de porosité d'interstice. Ces roches sont quasiment imperméables si elles ne sont pas fissurées ou altérées. Mais suite à l'altération du substratum, un réservoir sus-jacent se développe et contient la nappe des altérites que nous étudierons ici.

Les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir d'altérite, du point de vue de son fonctionnement, concernent à la fois les conditions aux limites (épaisseur du réservoir, notamment sa position par rapport au substratum et présence des rivières) et les paramètres hydrodynamiques.

II.4.1- Limite verticale du réservoir

Sur l'ensemble du bassin, la connaissance de la limite verticale du réservoir renvoie à celle de l'épaisseur basée sur la description des coupes lithostratigraphiques. Il n'existe pas de représentation de l'aquifère de la nappe libre à partir des puits villageois, points principaux d'accès aux nappes souterraines à partir de mesures piézométriques. En revanche au voisinage des puits, on trouve souvent des forages dont les coupes lithostratigraphiques sont disponibles.

Sur l'ensemble des 43 forages répertoriés (annexe 3 ; Jacquin et Seygona, 2004), 13 nous semblent trop éloignés de la zone d'étude pour être pris en compte dans l'analyse. Les 30 autres considérés apparaissent très inégalement répartis sur l'ensemble du bassin et son environ immédiat ; la partie centrale étant quasi dépourvue d'ouvrages (fig. 12).

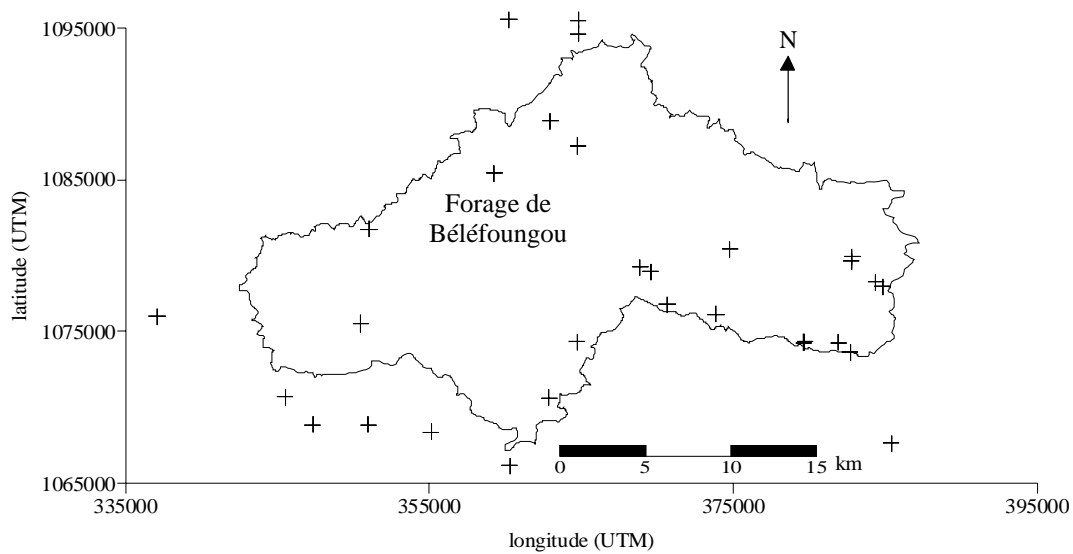


Figure 12 : Positionnement des forages d’hydraulique villageoise répertoriés sur le bassin versant de la Donga et sur ses bordures, la coupe lithologique du forage de Béléfongou sera décrite.

Les coupes lithostratigraphiques de ces forages indiquent dans l’ensemble, de la surface aux couches les plus profondes, un sol peu épais avec souvent présence de cuirasse latéritique en dessous de laquelle l’on rencontre des formations arénacées et argilo-sableuses. Ces formations reposent sur un substratum pourvu de fissures et de diaclases. Ce substratum plus ou moins altéré est connecté à un substratum plus sain. La figure 13 indique la coupe stratigraphique du forage de Béléfongou, l’un des plus profonds de la zone.

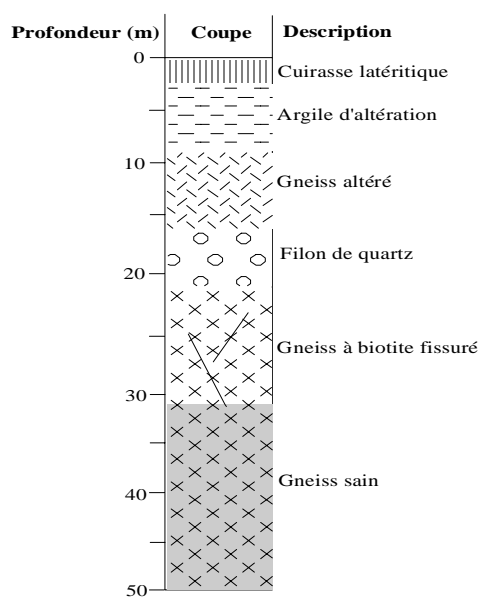


Figure 13 : Coupe lithostratigraphique du forage de Béléfongou.

Au total 15 couples puits/forage ont été constitués sur la base de la synthèse documentaire des 30 forages considérés. Les puits sont forés manuellement par des puisatiers locaux dans les altérites de versants et d'interfluves sans atteindre le socle. Ces altérites, de nature argileuse (quartz, mica, kaolinite et montmorillonite ; annexe 2), se caractérisent par une forte variabilité verticale et latérale de la lithologie selon les descriptions géologiques précédentes. Celles-ci reposent sur le socle fissuré dont la partie supérieure présente une forte irrégularité (fig. 14).

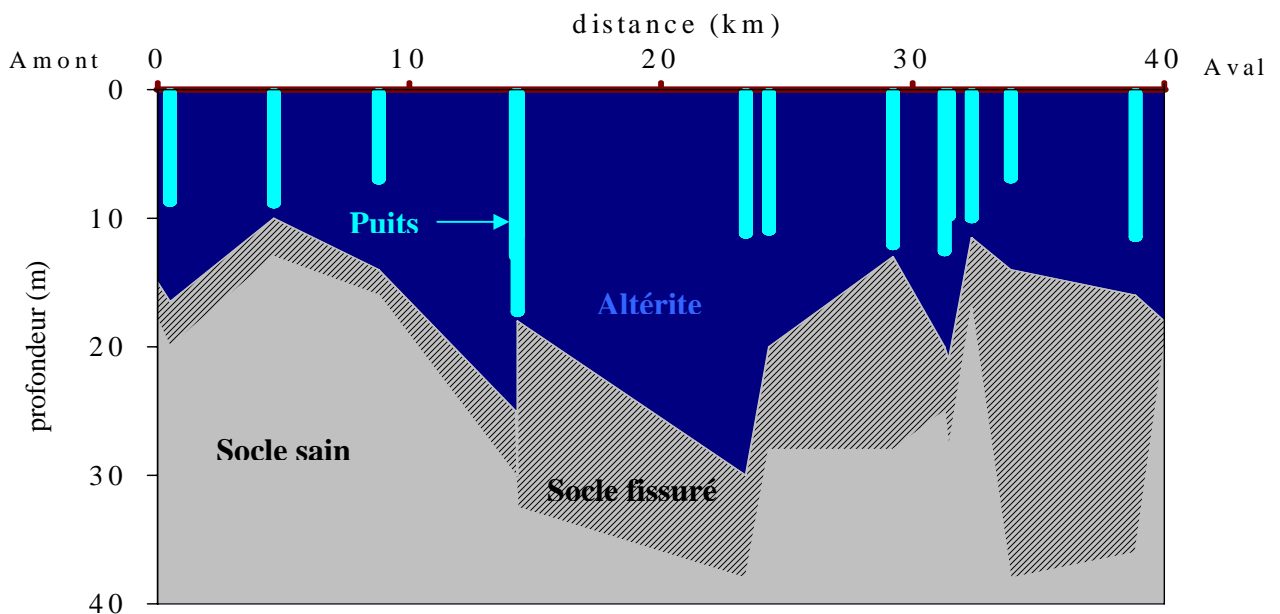


Figure 14 : Profondeur de la limite supérieure du substratum sain et fissuré et profondeur des puits servant aux mesures piézométriques.

Sur le site piézométrique expérimental (fig. 11), des mesures géophysiques ont été réalisées par tomographie électrique (Robain et Wubda, 2004). La tomographie électrique est un dispositif multi-électrode qui permet de mesurer de façon séquentielle la résistivité apparente avec des quadripôles de taille croissante. L'appareil utilisé est un SYSCAL R2 – MULTINODE de la société Iris Instruments. Au total, quatre profils d'investigation ont été considérés mais nous présenterons uniquement les résultats du profil PO1. Trois couches principales en fonction de la profondeur et des gammes de résistivité sont révélées (fig. 15) :

- une couche superficielle résistante (400 à 800 Ω .m) de 1 à 2 m, très hétérogène correspondant à des alternances de matériaux meubles et de matériaux indurés par les oxydes et hydroxydes de fer,

- une couche intermédiaire conductrice (150 à 300 $\Omega.m$) de 2 à 7 m, correspondant aux matériaux argileux d'altération. La faible résistivité de cette couche peut être associée à un contenu élevé en eau. Cette couche pourrait donc représenter le réservoir d'altérite étudié,
- une couche résistante profonde dont la limite supérieure est irrégulière et où l'on peut distinguer une partie continue de résistivité comprise entre 400 et 800 $\Omega.m$ et une partie inférieure discontinue de résistivité supérieure à 1500 $\Omega.m$. Cette couche représente le substrat rocheux plus ou moins altéré et présente plusieurs irrégularités d'amont en aval du profil.

Remarque importante : Au milieu du profil, entre les abscisses 325 à plus de 500 m, on observe une réduction considérable de la profondeur du substratum. Ceci pourrait avoir une incidence notable sur la piézométrie aussi bien du point de vue du transfert latéral des flux que de la différenciation des niveaux aquifères (fig. 15). Les observations ultérieures de la piézométrie (chapitre III. 3 suivant) nous renseigneront sur cette éventualité.

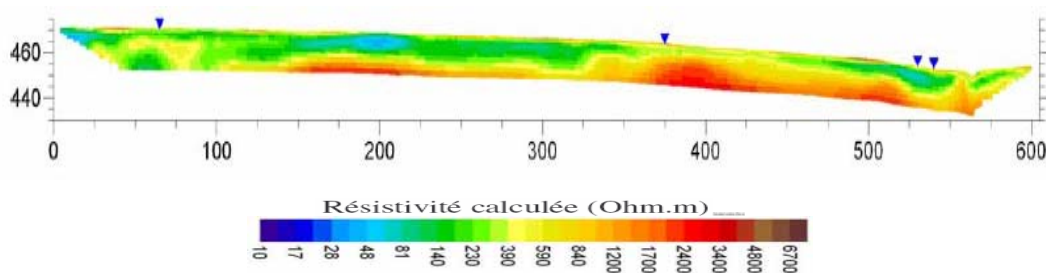


Figure 15 : Résultat de l'inversion des mesures de résistivité à l'échelle 1/1 pour le profil PO1 (cf. figure 8) du site piézométrique expérimental (Robain et Wubda, 2004).

II.4.2- Limite latérale du réservoir

Afin d'apprécier le sens de transferts des flux et de la limite latérale de l'aquifère, tous les puits et échelles limnimétriques ont été nivelés au moyen d'un GPS différentiel Trimble RTK 5700 (Kamagaté *et al.*, 2003). Le GPS en poste fixe servant de base de référence était installé sur le toit cimenté de la « paillote » de la « résidence mission » de Djougou tandis que l'autre GPS était mis en station sur le point à niveler. L'acquisition durait environ 30 minutes. Un post-traitement était ensuite calculé. Les coordonnées sont en mètre dans le système UTM- WGS84 (annexe 4). Les altitudes obtenues ne sont pas dans le même référentiel que celles des cartes au 1/50 000e disponibles sur le bassin de la Donga. Pour cela,

ces valeurs ont subi une correction à partir de la borne géodésique (face au restaurant le Kasar où débute la route de Djougou à Parakou) qui consiste à leur retirer 32,44 m. Il en résulte que la surface de la nappe libre est toujours en position haute par rapport à l'axe de drainage le plus proche. Le réseau hydrographique constituerait donc le drain potentiel des eaux souterraines. Ainsi, la surface piézométrique apparaît-elle plus ou moins parallèle à celle de la surface du sol. Ce résultat est confirmé par les observations géophysiques (Descloitres *et al.*, 2003 ; Robain et Wubda, 2004). Au contraire donc d'une nappe horizontale généralement rencontrée en bassin sédimentaire, la nappe phréatique apparaît comme composée de plusieurs nappes de versant dont l'orientation des flux est guidée par la pente de la topographie (fig. 16). Ceci traduit logiquement une convergence des flux souterrains vers les rivières.

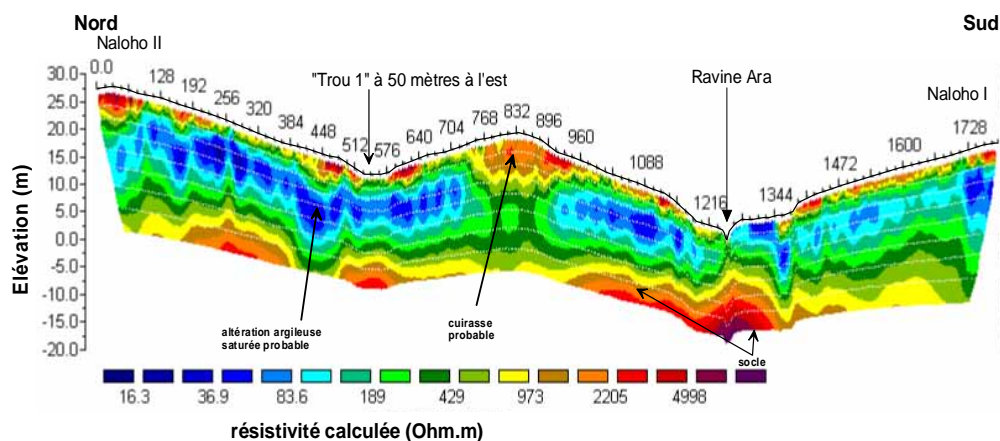


Figure 16 : Profil géophysique dans le bassin d'Ara Pont : dispositif Wenner alpha, écartement électrode 4 mètres, correction topographique (Descloitres *et al.*, 2003).

II.4.3- Paramètres hydrodynamiques

À l'échelle de l'ensemble du bassin, les paramètres hydrodynamiques connus du réservoir, notamment la porosité et la conductivité hydraulique sont extrêmement rares.

Pour la porosité, les seules mesures existantes ont été réalisées à la surface du sol, sans atteindre le réservoir étudié d'altérite (Braud *et al.*, 2004). Dans la littérature, la porosité totale des milieux argileux peut excéder 20 % (De Marsily, 1981).

Pour la conductivité hydraulique (Ks), quelques essais de pompage ont été réalisés dans les puits villageois en 2003. Avec des débits spécifiques de l'ordre de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, ces

essais fournissent des conductivités hydrauliques de l'ordre de 10^{-5} m.s^{-1} . Outre ces essais sur puits, des valeurs de transmissivité, images des conductivités hydrauliques, obtenues par essais de pompage lors de la réalisation des forages d'hydraulique villageoise existent (annexe 3). Elles varient de 6.10^{-7} à $4.10^{-4} \text{ m}^2 .\text{s}^{-1}$ pour une moyenne de $4,16.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Les valeurs de Ks pouvant être déduites de ces transmissivités ne sont pas valables pour le réservoir d'altérite étudié. Elles le sont uniquement pour la zone fissurée captée par les forages, entre l'altération et le socle sain. Rapportées à l'épaisseur de cette zone, les transmissivités fournissent des Ks variant de $1,25.10^{-4}$ à $9,50.10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. Ces valeurs sont bien du même ordre de grandeur que celles obtenues pour les puits captant les altérites sus-jacentes.

À l'échelle du versant expérimental, des mesures permettant d'obtenir d'autres valeurs de Ks ont été effectuées en février 2006 par L. Séguis et M. Métadier par la méthode du Slug-test (Cooper *et al.*, 1976). Les mesures sont réalisées dans la nappe pérenne à 10 et 20 m de profondeur aux points Amont, Milieu et Aval. Encore appelée "essai d'injection-Relaxation", cette méthode consiste à injecter ou retirer de l'eau à débit constant pendant un temps bref, puis à stopper l'injection et à mesurer la relaxation de pression après fermeture. Cette méthode est fortement dépendante des moyens de mesure de la pression et du débit, ce qui limite ce type d'essai à des zones de perméabilité de l'ordre de $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ à $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$. Elle permet l'évaluation de la conductivité hydraulique horizontale d'un aquifère à proximité immédiate d'un puit. Les résultats sont indiqués dans le tableau 3. Les valeurs de Ks sont bien comparables entre elles indépendamment de la profondeur et de la station. Les gammes de variation sont quasi identiques et ne sont pas particulièrement différentes de la gamme de 10^{-5} obtenue dans les puits et forages villageois.

Station	Profondeur (m)	Ks (m.s^{-1})
Amont	10	$1,4. 10^{-6}$
	20	pas de mesure
Milieu	10	$3,4. 10^{-7}$
	20	$2,9. 10^{-7}$
Aval	10	$3,1. 10^{-6}$
	20	$2,7. 10^{-6}$

Tableau 3 : Résultat du slug-test réalisé sur le site expérimental de Nalohou.

II.4.4- Conclusion

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 plus transmissif du fait des fractures et diaclases. Le réservoir d'altérite étudié présente une épaisseur très variable (3 à 20 m) du fait de la très forte irrégularité de la limite supérieure du substratum.

Parce que la surface de la nappe libre est toujours en position haute 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 $10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

III – FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE

III.1- Objectifs

La relation pluie/débit caractérise le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. Mais la non linéarité de cette relation rend souvent complexe sa compréhension et ses variabilités spatio-temporelles. Il s'agit donc dans ce chapitre de mieux comprendre les processus qui régissent ce fonctionnement à l'échelle du bassin de la Donga et de déterminer le bilan des flux hydriques sur les années hydrologiques 2002, 2003 et 2004. L'étude a pour cadre les trois sous-bassins emboîtés d'amont en aval (fig. 3). On procède à la caractérisation des différents termes du bilan :

- pluviométrie : variabilité spatio-temporelle du signal d'entrée à travers les lames précipitées,
- piézométrie : variabilité spatio-temporelle de la recharge et de la vidange des réservoirs hydrogéologiques,
- pertes par évapotranspiration (ETP),
- hydrométrie : réponse des sous-bassins à la pluviométrie.

Un croisement des informations recueillies devra permettre de dégager un schéma de fonctionnement hydrologique du bassin.

III.2- Pluviométrie

Le but de ce paragraphe est de quantifier la répartition spatio-temporelle du signal d'entrée sur les trois sous-bassins durant les trois années d'observation.

III.2.1- Réseau pluviographique

Au total, 16 pluviographes (de type OTT ou Elsyde Œdipe, annexe 5) forment le réseau pluviographique sur le bassin de la Donga à ce jour (fig. 17). La majeure partie du réseau (11 stations) a été mise en place en 2002. Antérieurement, depuis 1998, 5 stations existaient (Ananiga, Dapéréfougou, Djougou, Donga et Gaounga) permettant une caractérisation spatiale limitée de la pluviométrie. Une station supplémentaire (Kpégounou) 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 de vérité sol aux mesures radar.

Le bassin est également pourvu d'une station météorologique servant aux mesures des paramètres climatiques nécessaires au calcul de l'ETP qui sera traitée dans le chapitre suivant (III.3). À titre informatif, un radar Bande X a été installé en 2005 à Djougou en vue d'améliorer la connaissance de la dynamique spatio-temporelle des champs pluvieux.

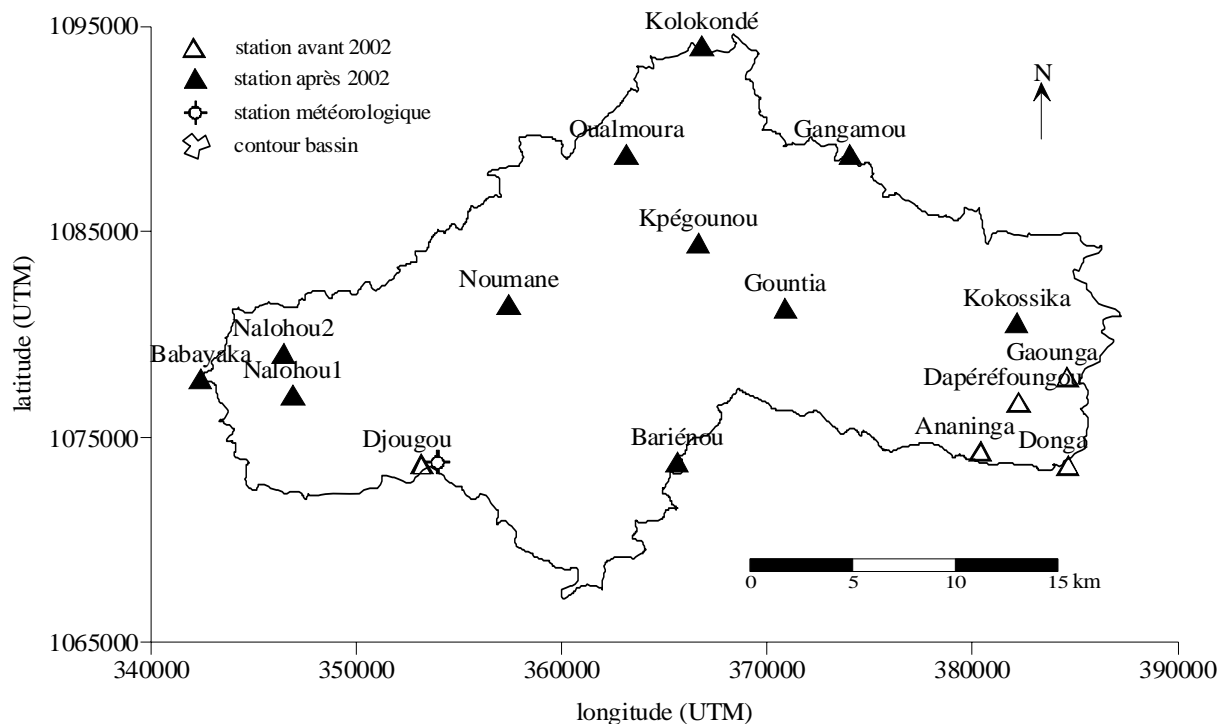


Figure 17 : Réseau de pluviographes et station météorologique sur le bassin de la Donga.

III.2.2- Acquisition des données

Les données brutes sont les temps de basculement des augets (correspondant à une hauteur d'eau égale à 0,5 mm pour les pluviographes Elsyde, les OTT étant des pluviographes à pesée). Pour l'exploitation, on établit ensuite les cumuls sur différents pas de temps (5 minutes, jour, année, etc.).

Des lacunes peuvent exister dans les chroniques. Elles sont imputables à des défauts d'alimentation (batterie, panneau solaire), à l'obstruction de la base du cône du pluviographe aboutissant aux augets et à du vandalisme (vol du panneau solaire). Des corrections sont donc apportées à ces lacunes en tenant compte de la cohérence entre le contrôle seau (en mm, l'eau ayant fait basculer les augets est conservée et sert de cumul de contrôle) et le nombre de basculements sur la période de fonctionnement. On tient compte également de la cohérence entre les données de la station considérée et celles observées aux stations les plus proches.

III.2.3- Distribution spatio-temporelle

La répartition spatio-temporelle des précipitations est abordée aussi bien à l'échelle annuelle, mensuelle que journalière. La caractérisation détaillée des champs de pluie fait l'objet de la thèse en cours de E. Lawin (Université d'Abomey Calavi).

Lames annuelles : l'intervalle de temps 2002-2004 est retenu comme fenêtre d'étude temporelle de la pluviométrie. Sur l'ensemble du bassin, seule la station de Djougou dispose de données historiques depuis 1950 (Direction de la Météorologie Nationale, DMN, 2001). Cette chronique permet de situer notre fenêtre d'étude par rapport aux années antérieures.

Un simple test de rupture, à partir de la méthode Bayésienne de Lee et Heghinian (logiciel KhronoStat, 1998), appliqué à la chronique 1950-2004 de la station de Djougou indique l'année 1969 comme année probable de rupture pluviométrique à ce poste. La moyenne pluviométrique était de l'ordre de 1300 mm avant cette rupture et 1150 mm après. Appliqué à la chronique 1950-2001 de la station de Djougou complétée par les pluies moyennes annuelles de 2002, 2003 et 2004 sur l'ensemble du bassin, ce même test indique toujours 1969 comme année de rupture pluviométrique.

Cette année charnière est nettement visible à partir des indices pluviométriques (fig. 18).

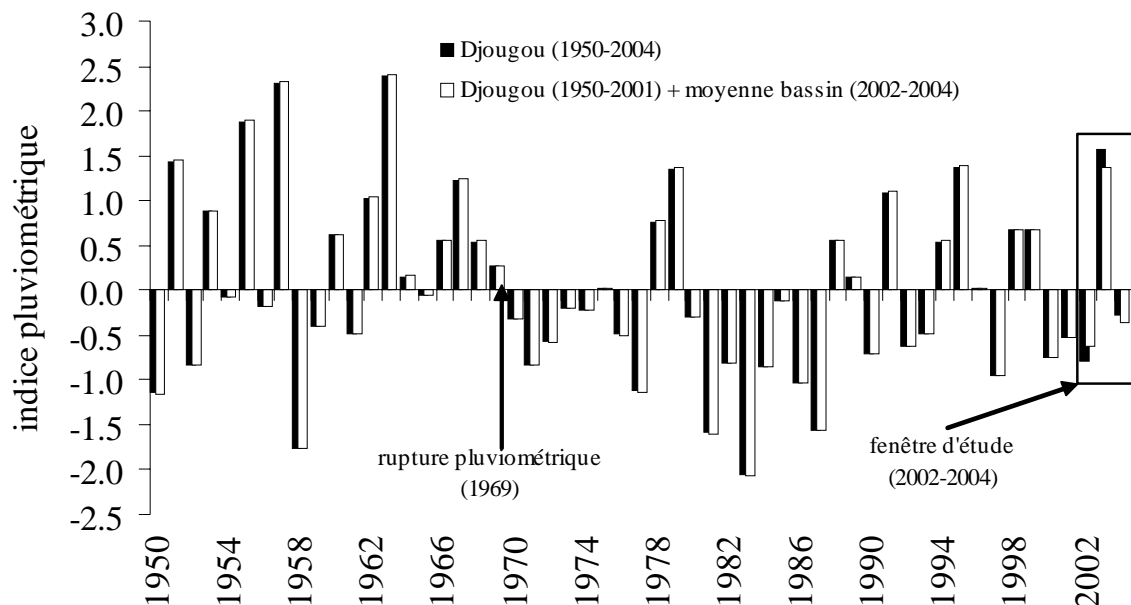


Figure 18 : Indices pluviométriques de 1950 à 2004 sur le bassin de la Donga.

Ces indices sont une image des hauteurs moyennes annuelles rendues adimensionnelles. C'est le rapport de la différence entre les hauteurs annuelles et la moyenne interannuelle et l'écart-type interannuel. Leur évolution indique que la fenêtre d'observation se situe dans la tendance générale du déficit pluviométrique. Mais si les années 2002 et 2004 ont une pluviométrie déficitaire, l'année 2003 est particulièrement excédentaire tout comme les années 1979, 1991 et 1995. L'étude portera donc sur deux années à pluviométrie déficitaire intercalées d'une année à pluviométrie excédentaire.

Les fréquences au non dépassement (F) de la pluie annuelle, calculées sur la base des cumuls annuels 1950-2004 à la station de Djougou et de la chronique 1950-2001 de Djougou complétée par les moyennes annuelles de 2002, 2003 et 2004, apparaissent plus faibles à la station de Djougou (0,1) que sur l'ensemble du bassin (0,2) en 2002 (fig. 19). En 2003, cette fréquence est de l'ordre de 0,9 aussi bien pour la station que pour le bassin entier. En 2004, c'est plutôt l'ensemble du bassin qui enregistre la plus faible fréquence.

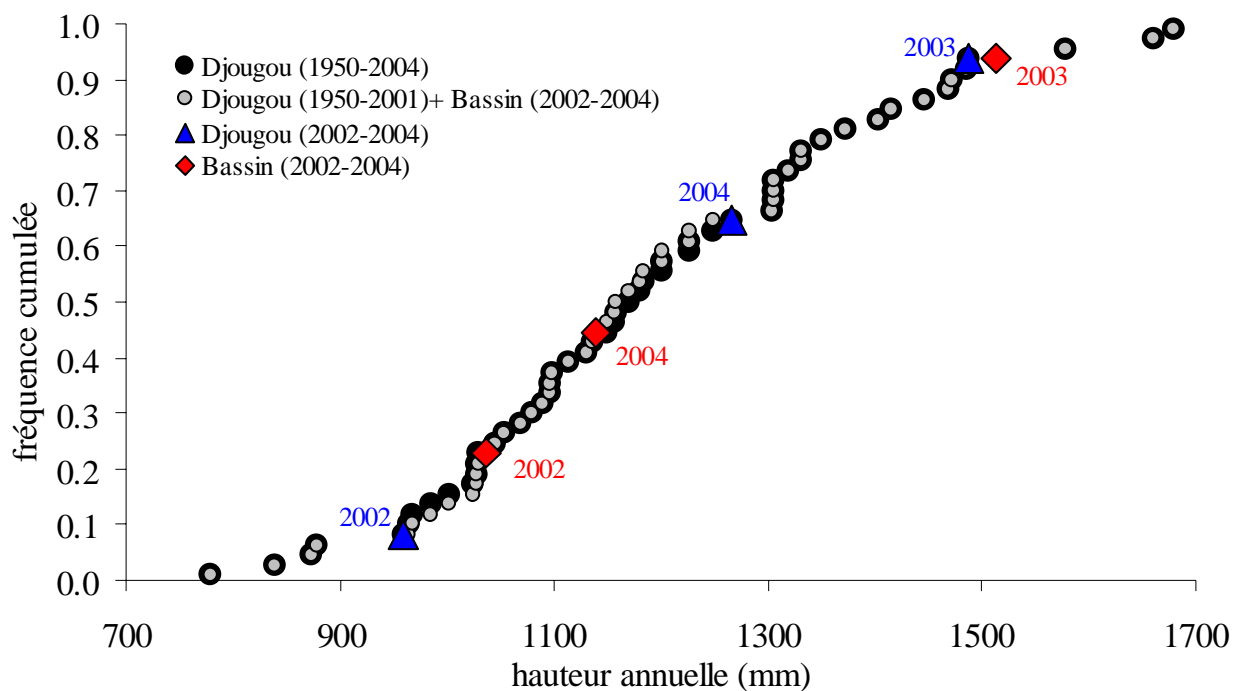


Figure 19 : Fréquence au non dépassement des hauteurs annuelles sur la base des chroniques 1950-2004 à la station de Djougou et 1950-2001 à la station de Djougou complétée par la moyenne 2002, 2003 et 2004 de l'ensemble du bassin.

La période de retour (ou période de récurrence T) qui est le nombre d'années séparant l'enregistrement de deux valeurs annuelles identiques est déduite de la relation $T = 1/F$ (tableau 4). La pluie annuelle mesurée en 2002 à la station de Djougou a une récurrence

de 9 années sur 10. Cette fréquence est quasiment identique pour l'ensemble du bassin (8 fois tous les 10 ans). Le cumul annuel 2003 a une période de retour de l'ordre de 1 fois tous les 10 ans aussi bien pour la station que pour l'ensemble du bassin. Le cumul de 2004 présente une période de retour plus petite que celle de 2002 et plus grande que celle de 2003. 2004 apparaît donc comme une année à pluviométrie intermédiaire.

	Hauteur 2002	Hauteur 2003	Hauteur 2004
Djougou	9 fois tous les 10 ans	1 fois tous les 10 ans	4 fois tous les 10 ans
Bassin	8 fois tous les 10 ans	1 fois tous les 10 ans	8 fois tous les 10 ans

Tableau 4 : Récurrence au dépassement des pluies annuelles 2002, 2003 et 2004 à la station de Djougou et pour l'ensemble du bassin.

La répartition spatiale des précipitations annuelles 2002, 2003 et 2004 a été cartographiée après krigeage des cumuls annuels enregistrés individuellement à chacune des stations de mesure (fig. 20, 21 et 22).

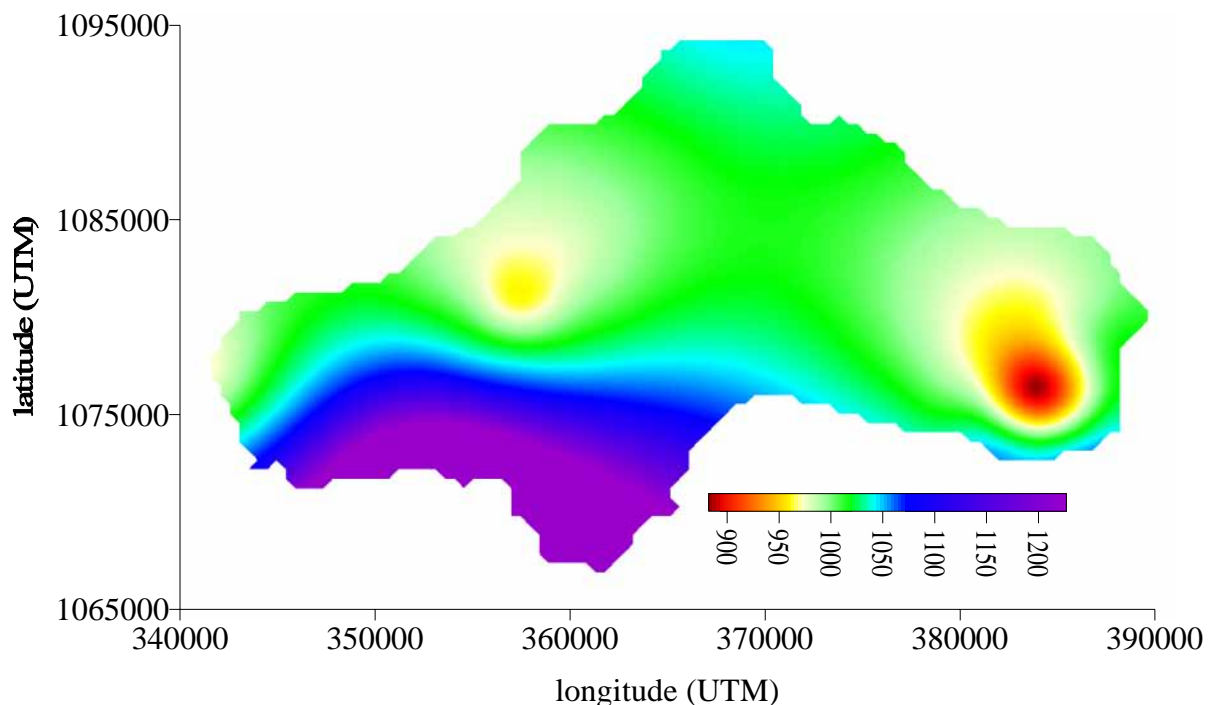


Figure 20 : Répartition spatiale des cumuls pluviométriques annuels (en mm) sur le bassin versant de la Donga en 2002.

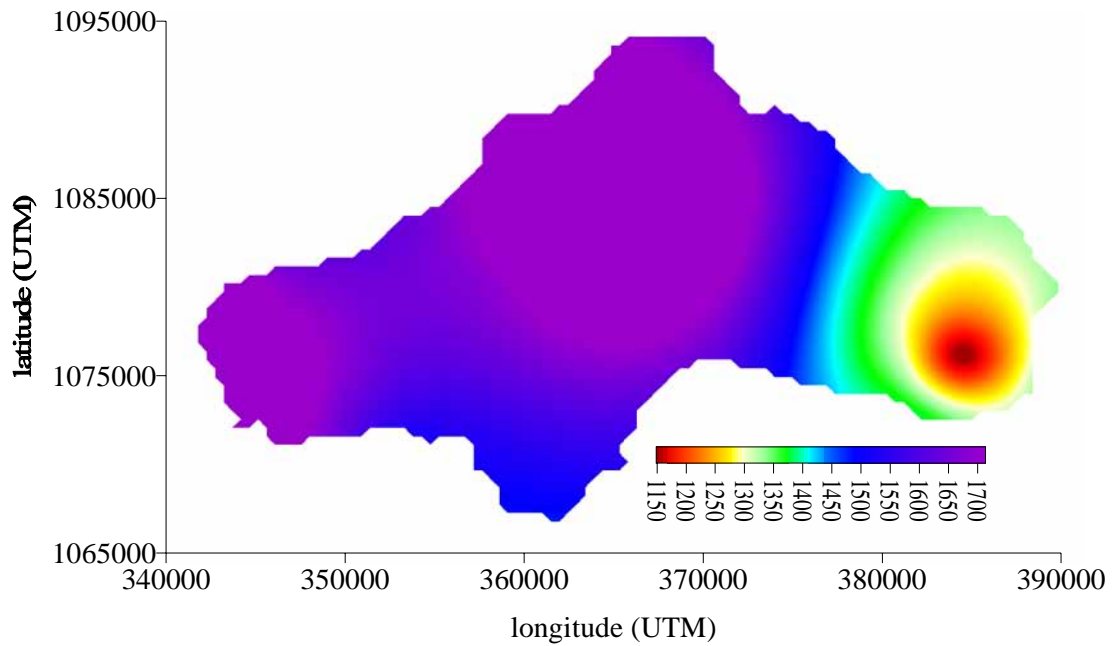


Figure 21 : Répartition spatiale des cumuls pluviométriques annuels (en mm) sur le bassin versant de la Donga en 2003.

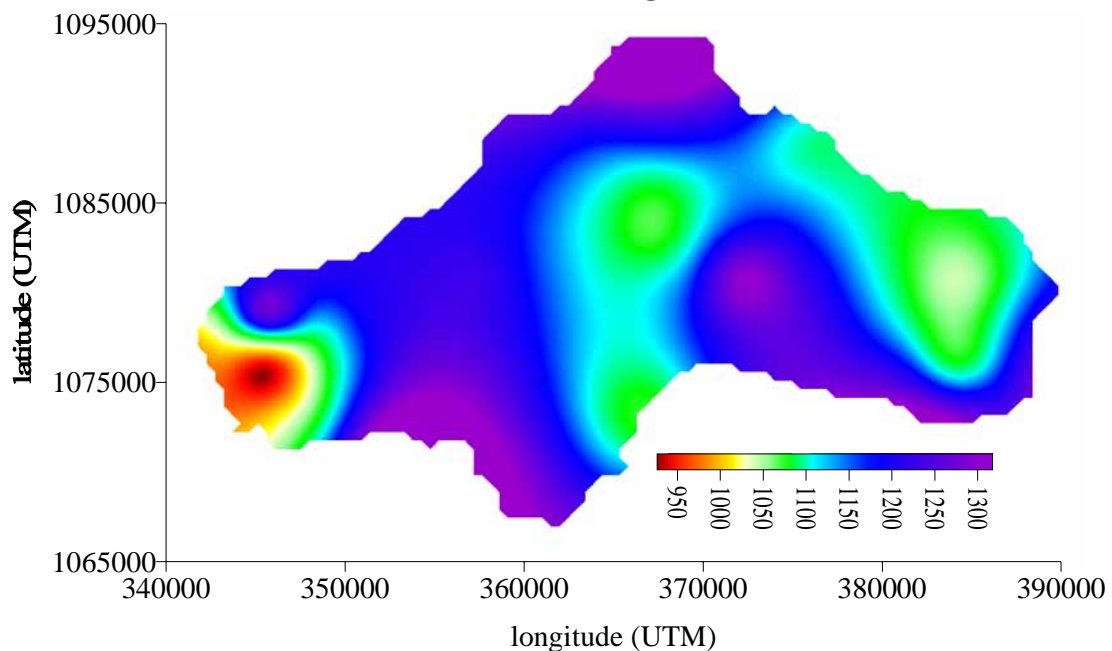


Figure 22 : Répartition spatiale des cumuls pluviométriques annuels (en mm) sur le bassin versant de la Donga en 2004.

En 2002, la gamme de variation des cumuls par station est d'environ 700 à 1120 mm. La partie sud ouest du bassin apparaît la plus arrosée. En 2003, la gamme de variation apparaît plus importante (1080 à 1740 mm). Deux grandes zones pluviométriques semblent se dessiner. La première couvre la grande partie ouest du bassin. Elle se limite à l'est par l'axe formé par les positions des stations de Bariéno et Gangamou. Cette zone se caractérise par des cumuls annuels quasi identiques traduisant une pluviométrie homogène. La deuxième

zone couvre le reste du bassin. Elle est marquée par une décroissance pluviométrique ouest-est avec un minimum observable toujours dans la zone de Ananinga. En 2004, les cumuls annuels par station varient de 650 à 1300 mm. Contrairement aux deux dernières années, la pointe ouest du bassin semble relativement moins arrosée. Cette zone met présente une dépression pluviométrique à très faible étendue. Elle apparaît également comme l'aboutissement d'un gradient très mal défini, qui part de la pointe orientale et traverse le centre du bassin. On retient donc l'absence d'une distribution spatiale organisée de la pluviométrie annuelle. Mais sur l'ensemble des trois années, la partie ouest de la zone, couvrant les sous-bassins d'Ara et Donga-Kolo, semble la mieux arrosée par rapport au reste du bassin. Cette distribution spatiale hétéroclite des cumuls pluviométriques n'est pas favorable à une bonne caractérisation spatiale annuelle du signal d'entrée dans les réservoirs souterrains.

Lames mensuelles : les lames moyennes mensuelles précipitées ont été calculées pour la station de Djougou avant et après la rupture pluviométrique de 1969. Ces moyennes sont comparées à celles obtenues sur l'ensemble du bassin en 2002, 2003 et 2004 (fig. 23).

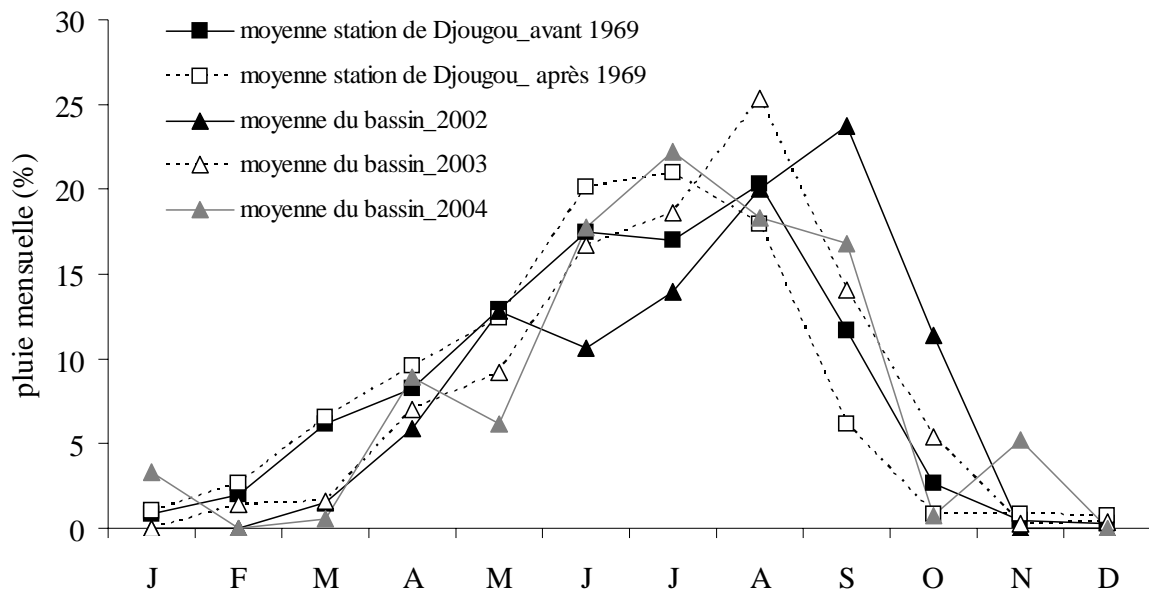


Figure 23 : Contribution moyenne mensuelle par rapport à la pluviométrie annuelle (%) avant et après la rupture pluviométrique de 1969 à la station de Djougou et sur l'ensemble du bassin de la Donga en 2002, 2003 et 2004.

A la station de Djougou, la répartition des précipitations est différente avant et après 1969. Les parts des mois de juin et juillet dans le cumul annuel augmentent après 1969 au détriment des mois d'août, septembre et octobre. Ce comportement moyen mis en évidence

ne doit pas cacher l'extrême variabilité d'une année à l'autre. L'année 2002 a son maximum en août, 2003 en septembre et 2004 en juillet.

Lames journalières : les fréquences cumulées sont calculées pour tester la récurrence des cumuls journaliers. À l'échelle du bassin, une séparation nette des valeurs des trois années d'observation se dégage (fig. 24 B). Pour une même fréquence, les cumuls journaliers de 2003 sont toujours supérieurs à ceux de 2004 qui sont supérieurs à ceux de 2002 en accord avec le cumul annuel sur l'ensemble du bassin. La particularité de l'année 2003 est liée à trois pluies (30 juillet, 22 août et 30 août) de très fortes valeurs journalières (supérieures à 60 mm) avec une période de retour très longue (environ une fois tous les 10 ans).

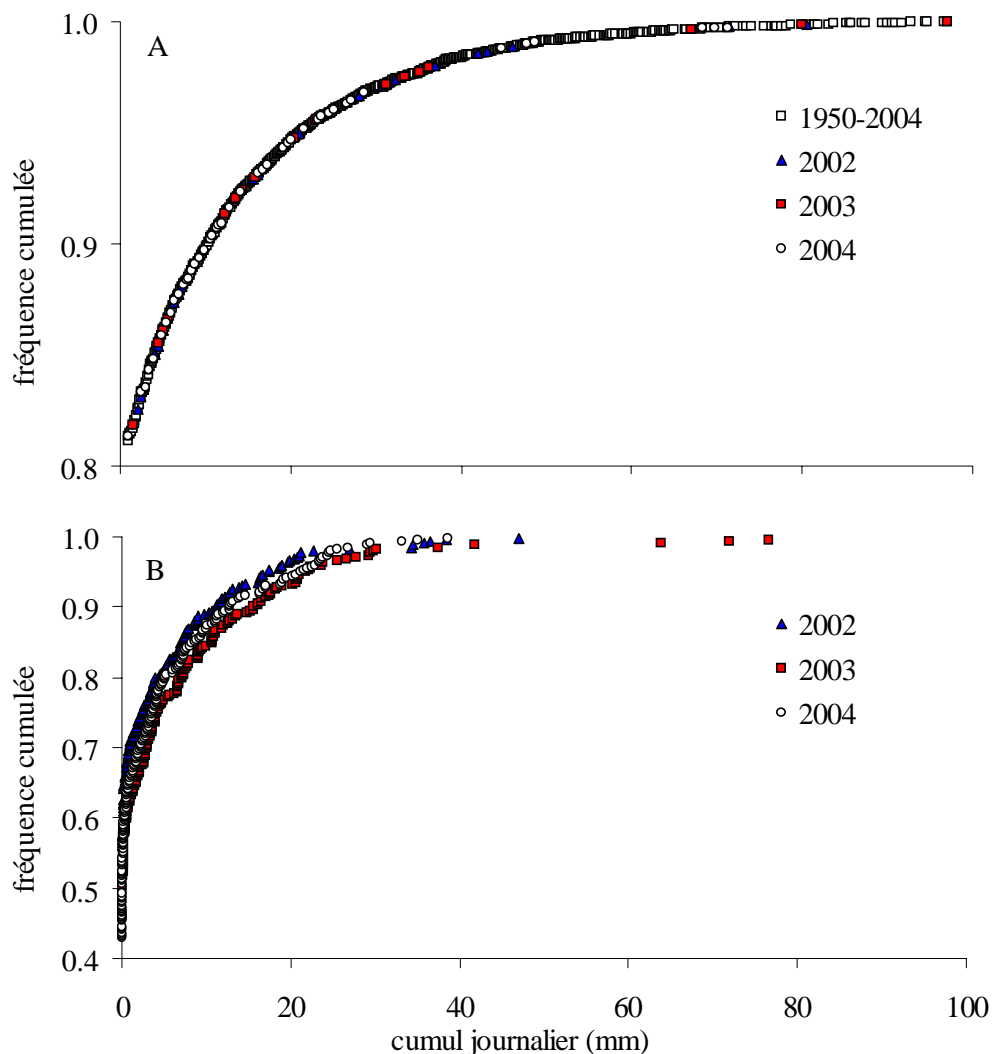


Figure 24 : Fréquence au non dépassement calculée sur la base des cumuls moyens journaliers à la station de Djougou (A) et sur l'ensemble du bassin (B).

III.2.4- Conclusion

L'année 2002 apparaît comme une année à faible pluviométrie tandis que 2003 est une année à pluviométrie particulièrement excédentaire. L'année 2004 s'interpose comme une année à pluviométrie intermédiaire. On n'observe pas d'organisation spatiale marquée en 2002 et 2004. En revanche, en 2003, on observe un gradient positif de l'est vers l'ouest du bassin. Plus de 50 % de la pluie annuelle est observé entre juillet et septembre. La particularité de l'année 2003 relève de trois fortes pluies à période de retour élevée.

III.3- Évapotranspiration

Dans un bilan, l'évapotranspiration constitue généralement le terme essentiel. L'étude porte sur les années 2002, 2003 et 2004 tout comme pour la pluviométrie. Mais avant la présentation des résultats, nous discutons de la disponibilité de données historiques.

III.3.1- Données historiques

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) historiques sont quasi inexistantes sur la zone d'étude. Les seules données de référence portent sur des moyennes mensuelles de l'ETP journalière calculée par la méthode de Penman à partir des données de l'ASECNA Cotonou (fig. 25 ; Le Barbé *et al.*, 1993). Mais ces données sont enregistrées à Parakou (latitude : 09° N 21' et longitude : 2° E 36') et Natitingou (latitude : 10° N 19' et longitude : 1° E 23') à des stations situées à des distances relativement importantes de notre zone d'étude. Ces moyennes mensuelles varient de 3,7 mm.j⁻¹ en juillet à 6,1 mm.j⁻¹ en août à Natitingou pour une moyenne annuelle d'environ 1700 mm. Elles vont de 3,0 mm.j⁻¹ en août à 5,9 mm.j⁻¹ en mars pour une moyenne annuelle d'environ 1600 mm à Parakou.

D'autres valeurs plus anciennes existent, mais elles portent cette fois sur des moyennes mensuelles d'évaporation « Colorado sur bac » obtenues à partir uniquement de la température et de l'humidité relative à la station de Djougou (latitude : 09° N 42' et longitude : 01° E 40'). La moyenne annuelle de l'évaporation déduite est estimée à 1800 mm à cette station pour des valeurs mensuelles comprises entre 3 et 8 mm/jour (fig. 25 ; Rodier, 1964).

Au regard de toutes les particularités relevées de ces valeurs d'ETP et d'évaporation Colorado, une comparaison avec les valeurs récentes obtenues dans le cadre de cette étude s'avère moins rigoureuse. Ces valeurs n'ont donc qu'un caractère informatif.

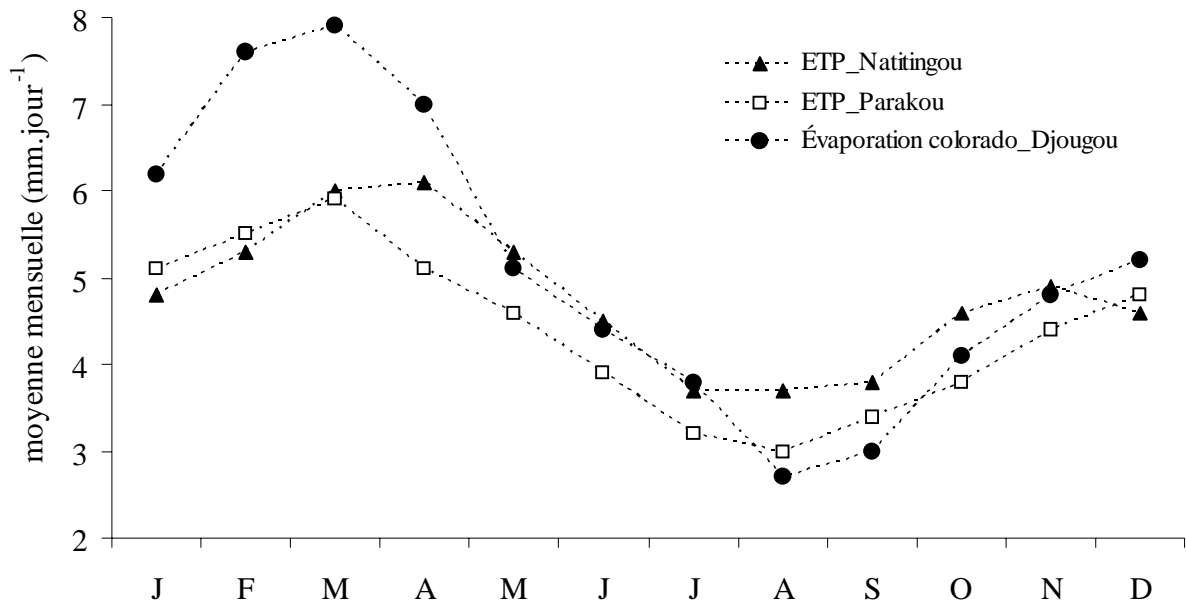


Figure 25 : Valeurs moyennes mensuelles de l'ETP Penman (mm/j) à Natitingou et Parakou (Le Barbé *et al.*, 1993) et valeurs mensuelles de l'évaporation Colorado sur bac (mm/j) à Djougou (Rodier, 1964).

III.3.2- Données récentes

On traitera d'une part de la station météorologique et des paramètres climatiques mesurés, nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle et d'autre part des lames évapotranspirées à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière.

III.3.2.1- Station météorologique et paramètres mesurés

Contrairement aux autres termes du bilan hydrologique, le terme de réseau de mesure n'est pas indiqué ici du fait de l'unicité de la station. La seule station existante sur l'ensemble de la zone d'étude a été installée en 2002 dans la cour des services des Travaux Publics de Djougou (fig. 17). Dans le cadre de la période intensive du programme AMMA, trois stations de mesures de flux ont été implantées sur les principaux couverts du bassin depuis fin 2005.

La station météorologique est constituée d'un enregistreur de type *Campbell CR 10 X* qui effectue des mesures au pas de temps de 15 mn. Les appareils de mesures, leurs caractéristiques et les variables sont détaillés dans le tableau 5.

Appareil	Marque	Modèle	Variable et unité
Temperature probesonde	Vaisala	HMP45C	Température de l'air (°C)
Relative humidity probes	Vaisala	HMP45C	humidité relative de l'air
Silicon Pyranomètre	Kipp & Zonen	SP-Lite	Radiation incidente (W/m ²)
Net Radiometer	Kipp & Zonen	NR-Lite	Radiation nette (W/m ²)
Moniteur de vent	Campbell	05103	Vitesse (m/s)
Moniteur de vent	Campbell	05103	Direction du vent (degré)
Baromètre	Druck	RPT410F	Pression atmosphérique

Tableau 5 : Caractéristiques de la station météorologique de Djougou.

III.3.2.2- Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Nous employons la méthode de la FAO (1998) qui est une dérivée de la formule de Penman-Monteith (Éq. 1).

$$\text{Éq. 1} \quad ETP = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma_{psy} \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

ETP est l'évapotranspiration (mm.j⁻¹), Δ est la pente de la relation entre la pression de vapeur saturante et la température, R_n est la radiation nette (Mj.m⁻².j⁻¹), G est le flux de chaleur au sol (Mj.m⁻².j⁻¹), ρ_a est la masse volumique moyenne de l'air, C_p est la capacité calorifique de l'air, $e_s - e_a$ traduit le déficit de pression de l'air, γ_{psy} est la constante de pression psychrométrique et r_s et r_a sont respectivement les résistance de surface et aérodynamique.

La méthode FAO (Éq. 2) propose de calculer une évapotranspiration de référence qui représente une surface bien irriguée dont la résistance est de 70 s.m⁻¹ avec une végétation essentiellement composée de gazon de 12 cm de hauteur et un albédo de 0,23. En intégrant donc ces hypothèses dans l'équation 1, on obtient l'équation Éq. 2 :

$$\text{Éq. 2} \quad ETP = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma_{psy} \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_{psy} (1 + 0,34u_2)}$$

R_n est la radiation nette ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), G est le flux de chaleur au sol ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), γ_{psy} est la constante de pression psychrométrique, T est la température moyenne journalière à 2 m du sol ($^{\circ}\text{C}$), U_2 est la vitesse du vent à 2 m du sol (m.s^{-1}), e_s est la pression de vapeur saturante (Kpa), e_a est la pression de vapeur réelle (Kpa), Δ est la pente de la relation entre la pression de vapeur saturante et la température ($\text{Kpa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

L'évapotranspiration potentielle est déterminée au pas journalier. La pression de vapeur réelle (e_a) est calculée à partir du minimum et maximum de température (au pas de 15 mn) observés dans la journée. La description détaillée des variables et du calcul est disponible dans le guide conçu par la FAO (1998).

III.3.2.3- Lames évapotranspirées

À l'échelle annuelle, les lames évapotranspirées pour les trois années d'observation sont très comparables (fig. 26). Mais la plus faible valeur est obtenue en 2002 car les mesures ont débuté en mars. Les deux années sans lacune (2003 et 2004) présentent des valeurs quasiment identiques. La variabilité pluviométrique interannuelle ne se retrouve donc pas dans l'évapotranspiration.

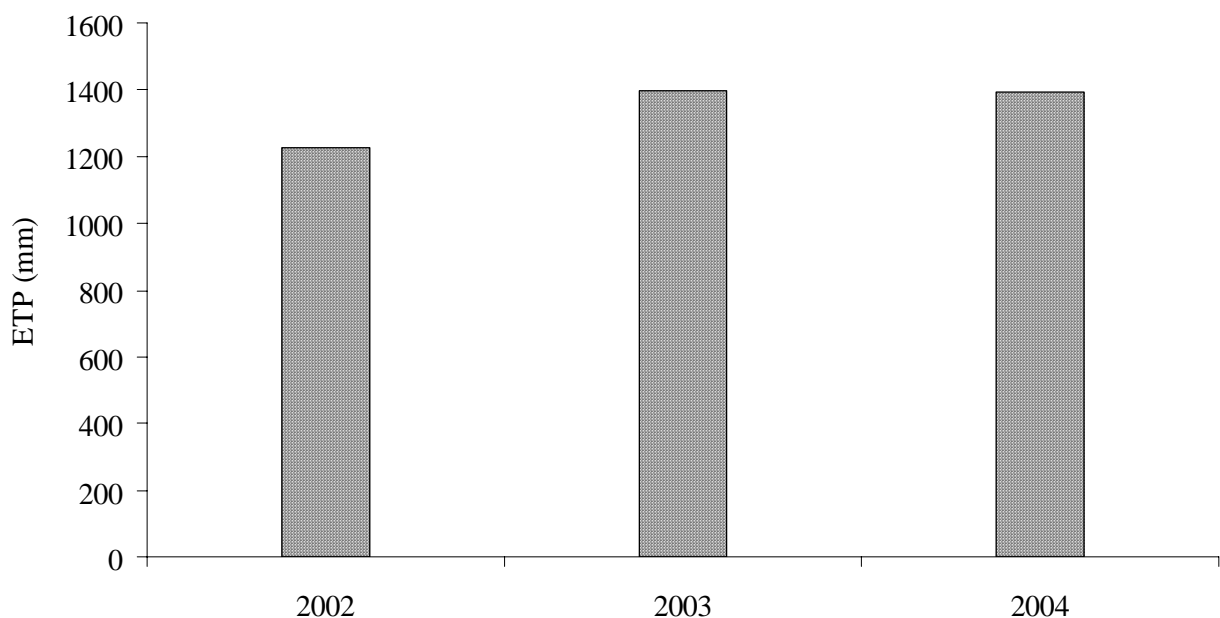


Figure 26 : Évapotranspiration potentielle annuelle calculée à partir des variables climatiques mesurées à la station météorologique de Djougou pour les années 2002, 2003 et 2004.

À l'échelle mensuelle, l'évapotranspiration potentielle varie de 3 à 5 mm.jour⁻¹ toutes années confondues (fig. 27). L'évolution présente deux pics centrés sur avril-mai et octobre. Ces valeurs récentes se rapprochent uniquement des données historiques entre les mois de mai et octobre. À l'échelle journalière, les valeurs d'ETP varient de 0,89 à 6,33 mm.jour⁻¹ (fig. 28).

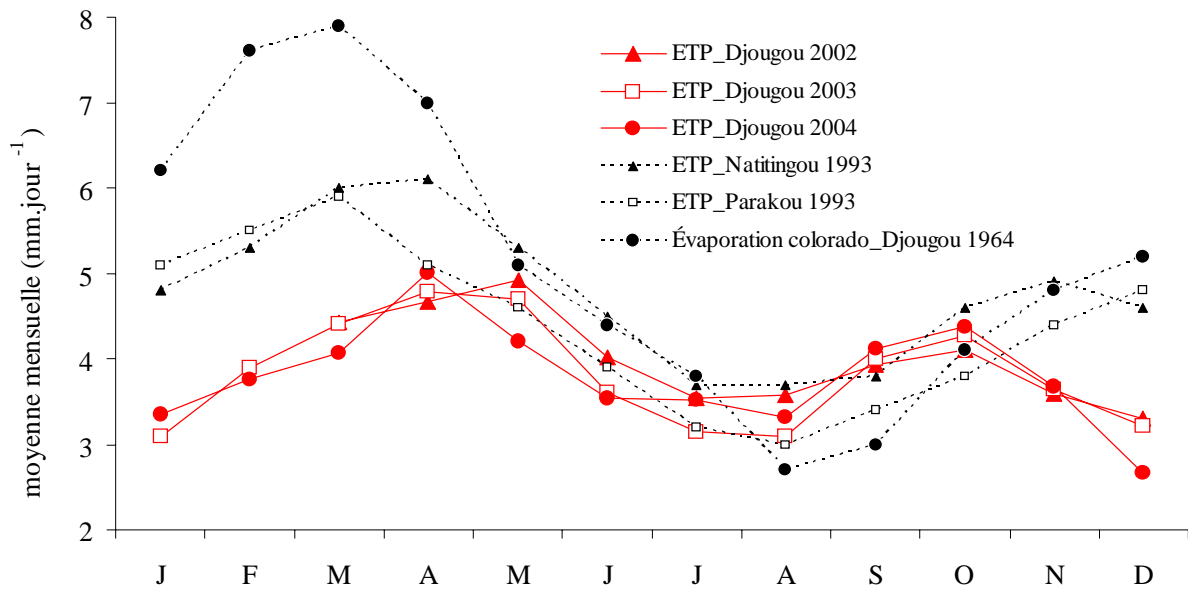


Figure 27 : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm.jour⁻¹) calculée à partir des variables climatiques mesurées à la station météorologique de Djougou pour les années 2002, 2003 et 2004.

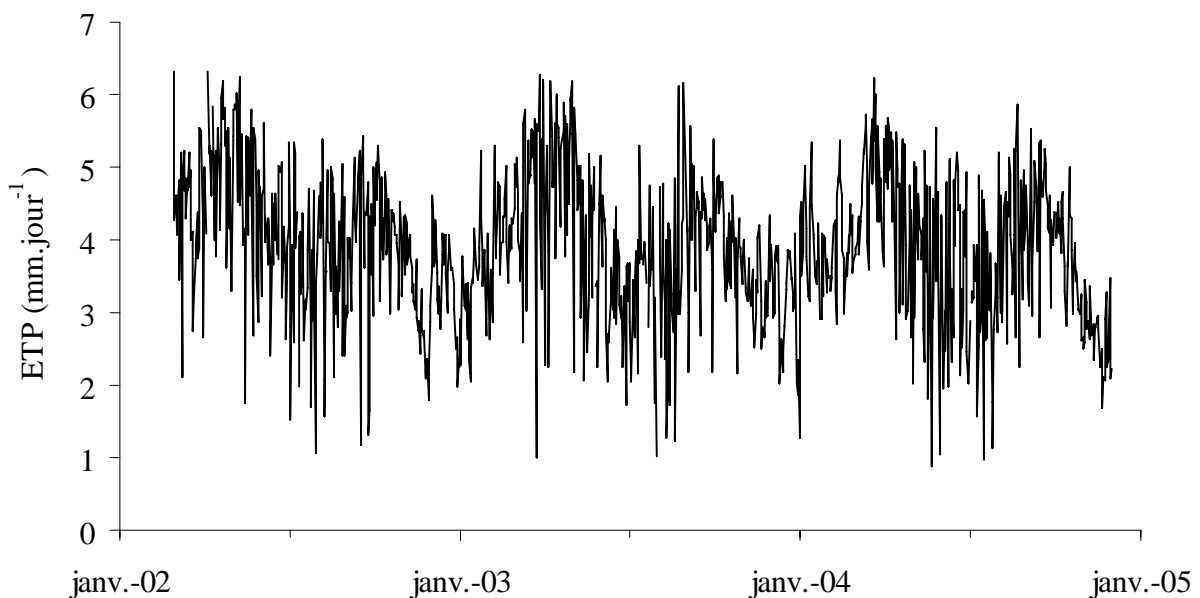


Figure 28 : Évapotranspiration potentielle journalière calculée à partir des variables climatiques mesurées à la station météorologique de Djougou pour les années 2002, 2003 et 2004.

III.3.3- Conclusion

Les valeurs annuelles de ETP apparaissent très comparables, sans variation interannuelle importante. Une forte variabilité mensuelle (maximums mesurés en avril ou mai et octobre) et journalière à l'intérieur d'une même année est néanmoins observée.

III.4- Piézométrie

Aucune étude piézométrique n'a été réalisée auparavant sur le bassin de la Donga. En dehors des rapports de forage qui donnent une idée approximative du niveau de la nappe phréatique, les données anciennes exploitables sont quasi inexistantes. La phase pratique du projet AMMA CATCH-Bénin a permis de combler le déficit de données par la mise en place d'un réseau piézométrique relativement dense.

À l'échelle du bassin, les puits villageois constituent l'essentiel des points d'accès à la nappe libre. À l'échelle d'un versant du bassin d'Ara, les piézomètres expérimentaux installés de la ligne de crête jusqu'à la rivière en bas du versant permettent une investigation ciblée.

III.4.1- Échelle du bassin

Avant la présentation et l'interprétation des chroniques piézométriques, nous procédons à une description détaillée à la fois du réseau de mesure et des différents types de mesures réalisées.

III.4.1.1- Réseau de mesure

La mise en place du réseau piézométrique a débuté en 1999 avec 6 puits (Babayaka, Dendougou, Djougou, Koua, Sérivéri et Téwamou) que l'on a équipés de limnigraphe à flotteur (type *Thalymédes* OTT). Mais l'essentiel du réseau actuel a été installé en 2000. Deux stations supplémentaires (Moné et Kpégounou) ont été installées en 2003. On compte au total 23 points de mesures piézométriques (la station de Gniouri a été abandonnée par la suite pour cause de mauvais fonctionnement permanent, fig. 29) dont 13 sont à la fois équipés de système de mesure automatique et suivis trois fois par jour par des observateurs villageois recrutés sur place. Les dix autres sont uniquement suivis par les observateurs. Les puits sont pour la plupart cimentés à partir d'un empilement de buses d'environ 1 m de hauteur à paroi étanche, sauf à la jointure. Les diamètres des puits varient de 1 à 2 m. Ils sont

généralement surmontés d'une margelle dont la hauteur par rapport au sol varie dans l'ensemble de 0,6 à 1,25 m. Les profondeurs totales varient de 7 à 18 m, mais près de 60 % présentent des profondeurs comprises entre 11 et 13 m (fig. 30). Les altitudes s'échelonnent de 340 à 490 m. Les coordonnées et les caractéristiques géométriques de tous les puits utilisés sont consignées dans le tableau annexe 4.

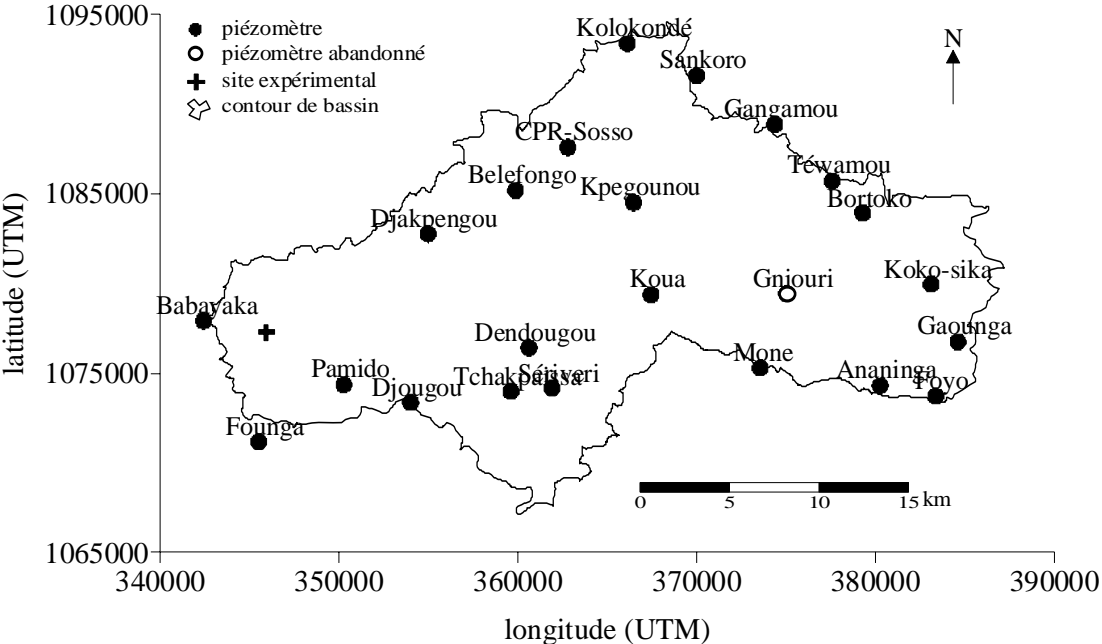


Figure 29 : Réseau de puits villageois et site piézométrique expérimental sur le bassin de la Donga.

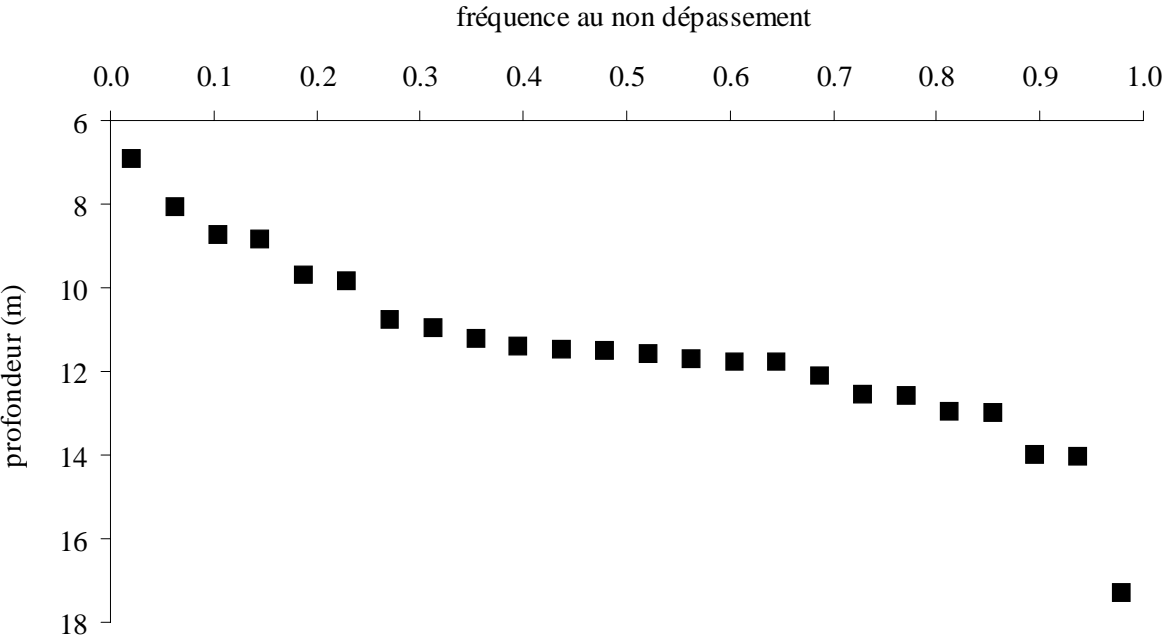


Figure 30 : Fréquence au non dépassement des profondeurs des puits servant aux mesures piézométriques.

III.4.1.2- Acquisition des données

Deux types de mesures piézométriques sont réalisés sur les puits villageois. Ce sont les mesures dites « enregistreurs » et les mesures dites « lecteurs ».

Mesures « enregistreur » : les enregistrements piézométriques sont réalisés au moyen de *Thalimédes* commandé par un flotteur installé dans le puits. Les mesures de la profondeur de la nappe sont faites en continu (pas de 5 min) 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 (fig. 31). 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 le niveau d'eau actuel, 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.

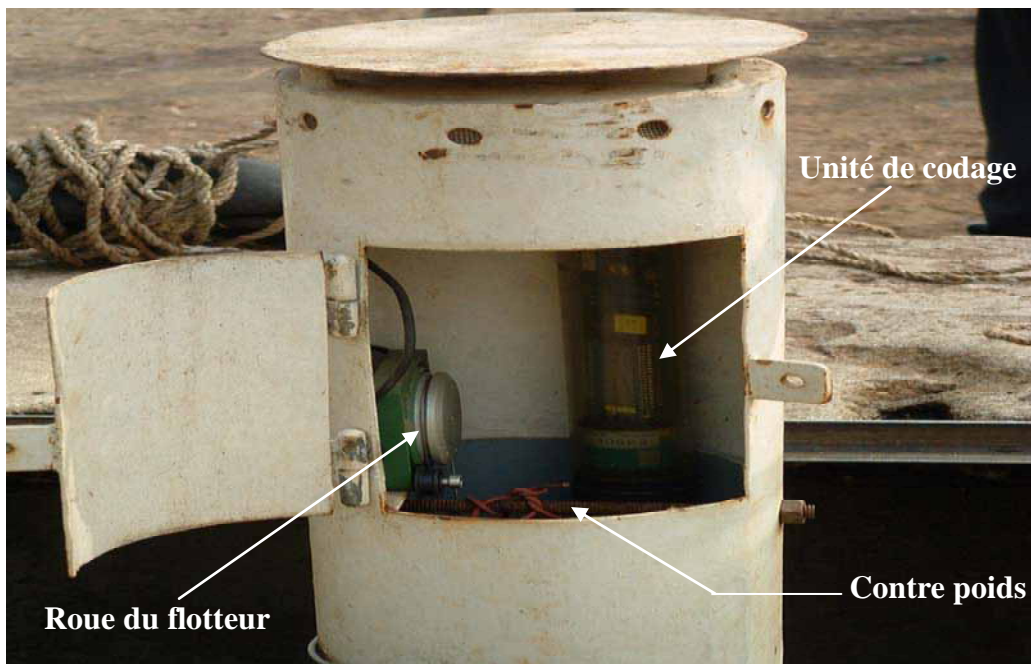


Figure 31 : Les composantes du système automatique de mesure piézométrique.

Mesures « lecteur » : au moyen d'une planchette en bois (faisant office de flotteur) attachée à l'extrémité d'un décimètre, la profondeur de l'eau est mesurée trois fois par jour (matin, midi et soir) par un observateur villageois formé à l'occasion. La disponibilité et la rigueur des lecteurs constituent les facteurs les plus déterminants dans la réalisation

effective de la mesure et la qualité des données récoltées. Ces données servent généralement à porter des corrections et combler les lacunes éventuelles dans les mesures « enregistreurs ».

III.4.1.3- Critiques et représentativité des relevés

Les mesures ponctuelles effectuées par les équipes IRD (lors de leur passage dans les villages concernés par l'étude) sont très souvent proches de celles réalisées par les lecteurs villageois. En dehors de quelques lacunes dues à l'absence du lecteur au moment de la mesure, les données « lecteur » sont généralement de bonne qualité.

Les chroniques issues des limnigraphes à flotteur sont susceptibles d'être affectées par trois types d'erreur : absence de mesures (piles épuisées, panne du système) illustrée par les lacunes dans les séries ; dans ce cas une reconstitution est possible au moyen des mesures « lecteur » si celles-ci existent, le blocage de la poulie impliquant la constance des valeurs ; une reconstitution est possible également à partir des mesures « lecteur » sinon ces mesures sont expressément retirées de l'analyse et enfin le montage inverse du câble sur la poulie induisant une inversion du piézogramme. Ces inversions sont corrigées en considérant un sens de variation inverse à celui relevé par l'enregistreur.

D'autres perturbations observables dans les chroniques proviennent des puisages domestiques. Les prélèvements villageois (matin, milieu de journée et soir), aussi bien en saison sèche qu'en saison pluvieuse, modifient le niveau piézométrique véritable de la nappe en induisant un cône de rabattement local. Mais l'impact semble plus important en saison sèche. La conséquence est que le niveau statique n'est jamais observé. Mais l'estimation d'une ampleur moyenne des prélèvements villageois à partir uniquement de la piézométrie reste très complexe du fait de la très forte variabilité des intensités de puisage (fig. 32). L'essentiel des ressources en eau à usage domestique provient des puits villageois disséminés sur l'ensemble du bassin. Nous avons mené une estimation des prélèvements par suivi de terrain des puisages quotidiens, en 2003 dans neuf villages choisis de façon homogène sur l'ensemble du bassin. Il était question du comptage journalier du nombre de seau d'eau (dont on connaît le volume) extrait par puits dans la localité choisie. Sur la base d'une population de 20 000 habitants, la consommation domestique en eau est de l'ordre de $21 \text{ l.hab}^{-1}.\text{jour}^{-1}$, une valeur proche de celle de $17 \text{ l.hab}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ estimée pour l'ensemble de la haute vallée de l'Ouémé (Hadjer *et al.*, 2005). Ceci implique des prélèvements anthropiques faibles, de l'ordre de $0,2 \text{ mm.an}^{-1}$.

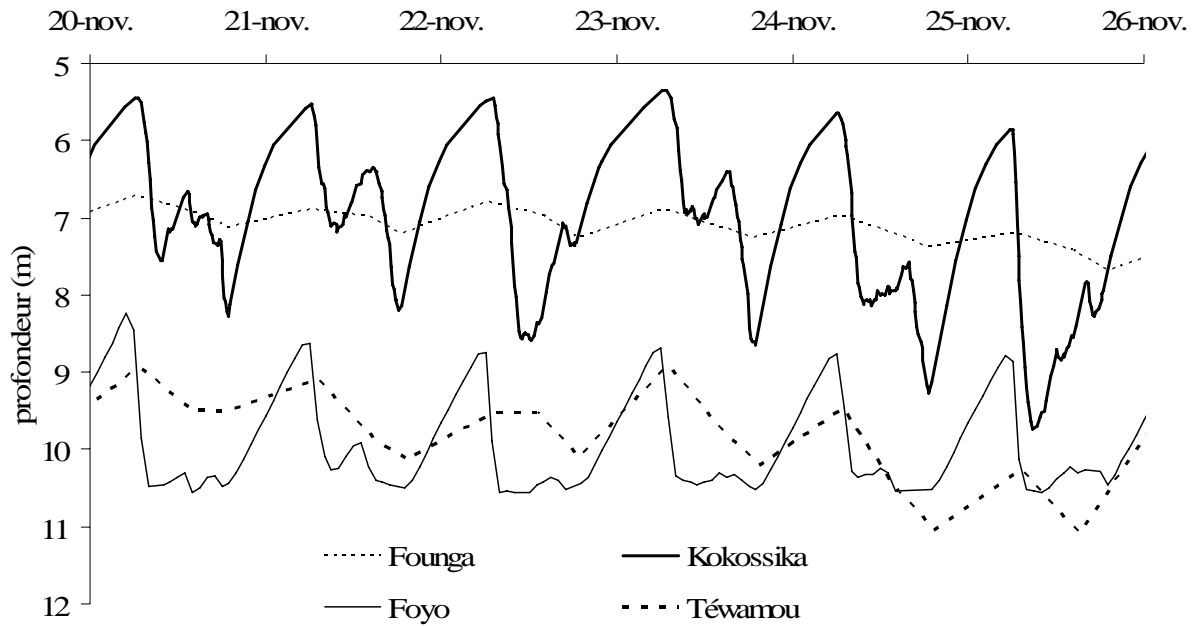


Figure 32 : Exemple typique de l’amplitude des fluctuations piézométriques dues aux puisages domestiques quotidiens.

Outre les puisages, d’autres biais peuvent également influencer les chroniques piézométriques. Au cours des fortes averses, le voisinage immédiat de certains puits peut être inondé, notamment en zone marécageuse. Des infiltrations préférentielles le long du cuvelage du puits peuvent donc intervenir et causer des hausses piézométriques anormales.

Après les corrections éventuelles portées aux chroniques, il importe de sélectionner les valeurs les plus proches de l’état d’équilibre de la nappe. Il ne semble pas nécessaire d’étudier les variations du niveau de la nappe à une échelle de temps plus fine que le jour. Le choix des données exploitables sera fondé sur la recherche de la profondeur minimale journalière. La nappe est généralement à son niveau le plus haut juste avant le puisage matinal (avant 6 du matin ; fig. 33). Pour les chroniques « enregistreur » les données seront donc constituées des minimas journaliers tandis que pour les chroniques « lecteur », elles seront formées des valeurs enregistrées le matin.

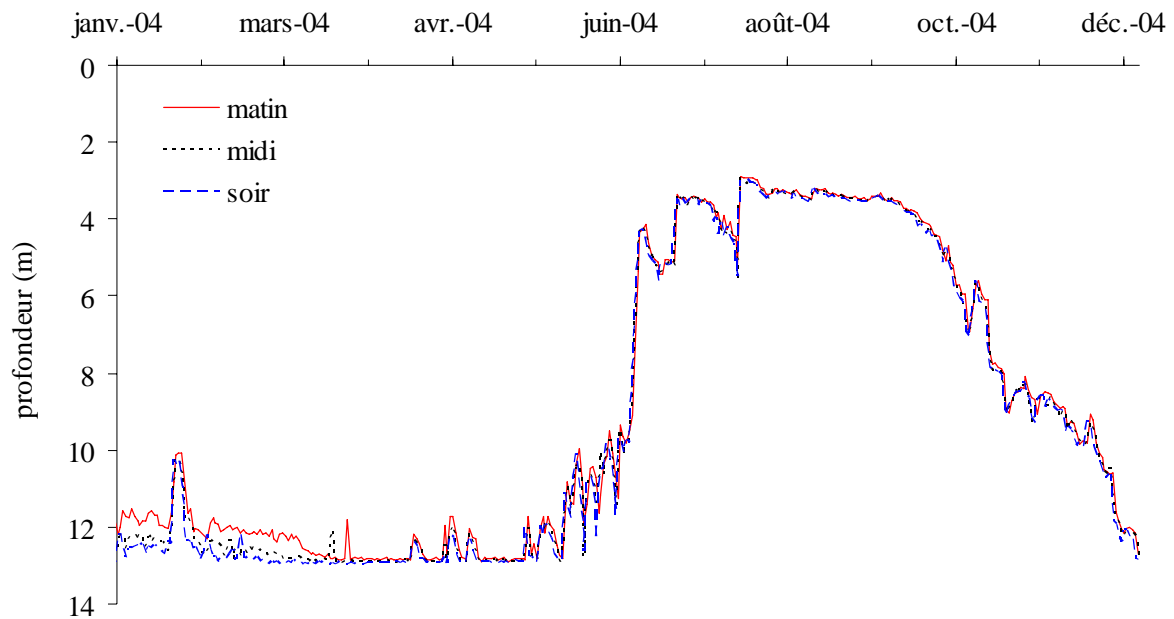


Figure 33 : Mesures « lecteur » effectuées matin, midi et soir à la station d'Ananiga

III.4.1.4- Fluctuations piézométriques

Avant l'exploitation des fluctuations récentes de la piézométrie, on peut apprécier les niveaux historiques de la nappe à partir des données consignées dans les archives de forages (Jacquin et Seygona, 2004).

- **Historique du niveau de la nappe libre**

Une vue rétrospective de la profondeur de la nappe phréatique à travers les puits n'a pas été possible du fait de l'absence de suivi. Elle ne peut être appréciée qu'à partir des niveaux d'eau relevés dans les forages d'hydraulique villageoise qui captent généralement les réservoirs de socle. Une observation des grandes tendances (à la hausse ou à la baisse) s'avère donc difficile.

Les mesures anciennes, les dates de mesure et les stations concernées sont indiquées en annexe 6. Elles sont réalisées tant en saison humide (6^{ième}, 7^{ième} et 8^{ième} mois) qu'en saison sèche (les autres mois). Les profondeurs varient très fortement, de 1,4 m à 12 m. Ceci pourrait indiquer d'une part un effet de saison et d'autre part une grande variabilité des prélèvements locaux domestiques à proximité des forages. Une différence de nature et donc de porosité des formations influençant la recharge peut également être mise en cause.

Les mesures anciennes sont observées en parallèle aux mesures récentes réalisées à des jours et des mois identiques pour la même station (annexe 6). Cependant la limite de cette

comparaison est que les mesures récentes sont effectuées dans des puits captant les réservoirs d'altérite tandis que les mesures anciennes proviennent des forages qui accèdent en général aux réservoirs de socle, les années de mesure étant également différentes. Une comparaison entre ces deux catégories de donnée, moins qu'une analyse rigoureuse a un caractère purement indicatif. On constate qu'au moment de la mesure dans le forage, le niveau d'eau statique se situe au dessus de la limite socle-altérite. Le réservoir de socle atteint par les forages semble être donc en relation avec la nappe des altérites captée par les puits villageois. Le plus souvent, le niveau d'eau dans le forage est supérieur à celui du puits voisin (fig. 34). Ceci indique l'influence du rabattement dans les puits villageois. Au-delà de ces constatations, il semble difficile d'interpréter d'avantage ces niveaux d'eau anciens et épars dans les forages.

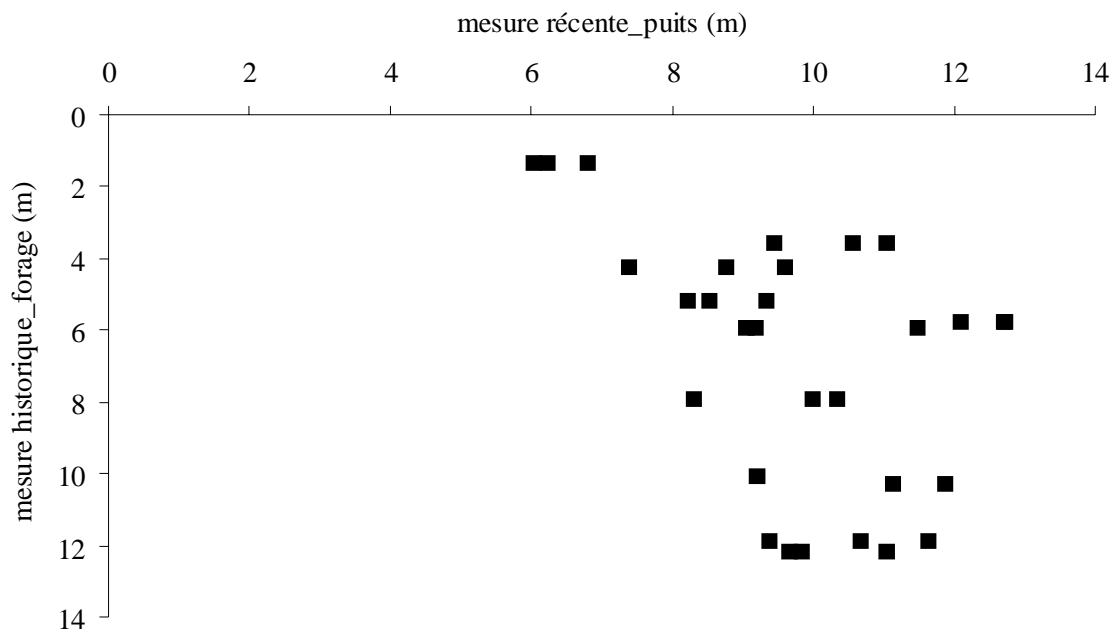


Figure 34 : Niveaux historique et récent de la nappe phréatique mesurés respectivement dans les forages et puits les plus proches.

- **Dynamique de la nappe libre**

L'altitude du sol et la profondeur de la nappe au point de mesure ont été observées simultanément en période sèche (fig. 35). Pour une même altitude du sol, divers niveaux de la nappe sont enregistrés. La profondeur de la nappe phréatique apparaît donc totalement indépendante de l'altitude du sol au point de mesure. L'analyse piézométrique qui va suivre se résumera donc à l'analyse des variations de la profondeur de l'eau.

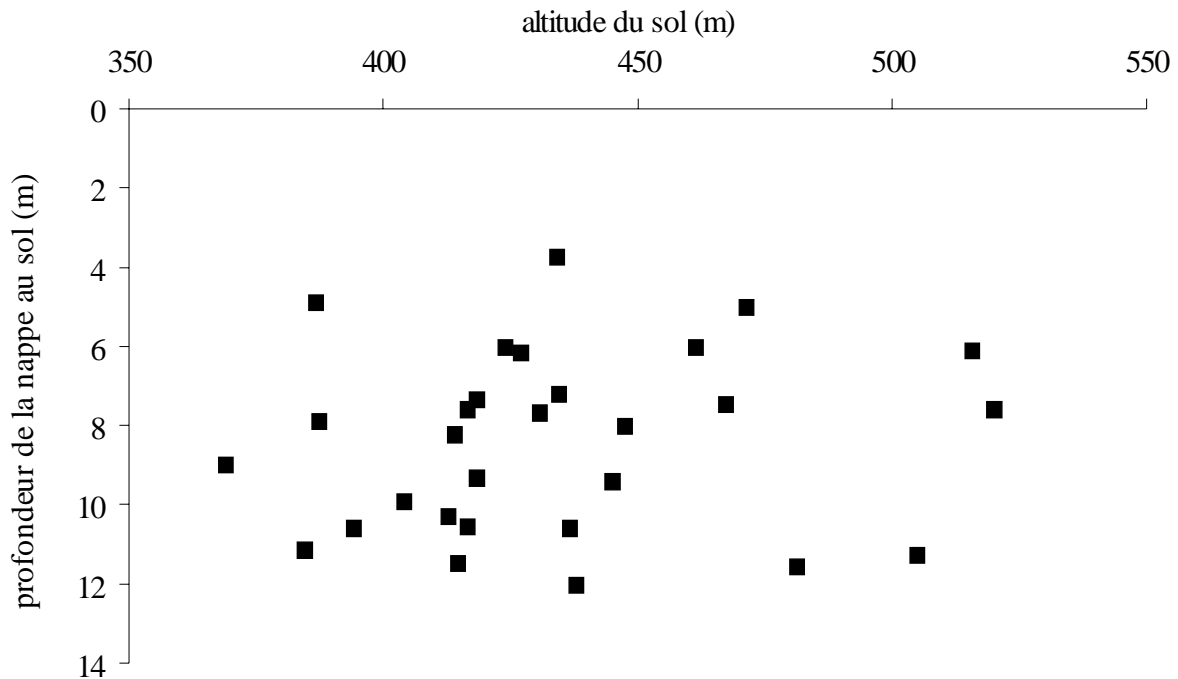


Figure 35 : Profondeur de la nappe phréatique et altitude du sol au point de mesure.

Du point de vue spatial, il apparaît inapproprié de concevoir une carte piézométrique, du fait qu'en zone de socle, les aquifères sont très discontinus. Les surfaces piézométriques suivent également la topographie (fig. 16). On ne peut donc pas parler d'une nappe régionale mais de nappes locales qui suivent la topographie des versants. Ceci oblige à une observation individuelle de chaque point de mesure.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, tous les points de mesure présentent des fluctuations saisonnières annuelles (annexe 7). Cette fluctuation est illustrée par la piézométrie enregistrée à la station de Djougou où l'on dispose de la plus longue chronique (1999-2005, fig. 36). Le fond du puits en 2003 est indiqué en complément. Cette fluctuation saisonnière observée pour tous les puits traduit l'absence de zone préférentielle de recharge ; l'ensemble de la surface du bassin semble donc contribuer à la mise en charge du réservoir. Ceci met également en évidence des processus de recharge localisés, synonyme d'une forte variabilité spatiale de la recharge. Cette idée se confirme par de très fortes variations des amplitudes piézométriques annuelles (de 2,5 à 12,5 m) traduisant l'hétérogénéité spatiale des paramètres de recharge (variabilité spatiale de la pluie et des paramètres hydrodynamiques).

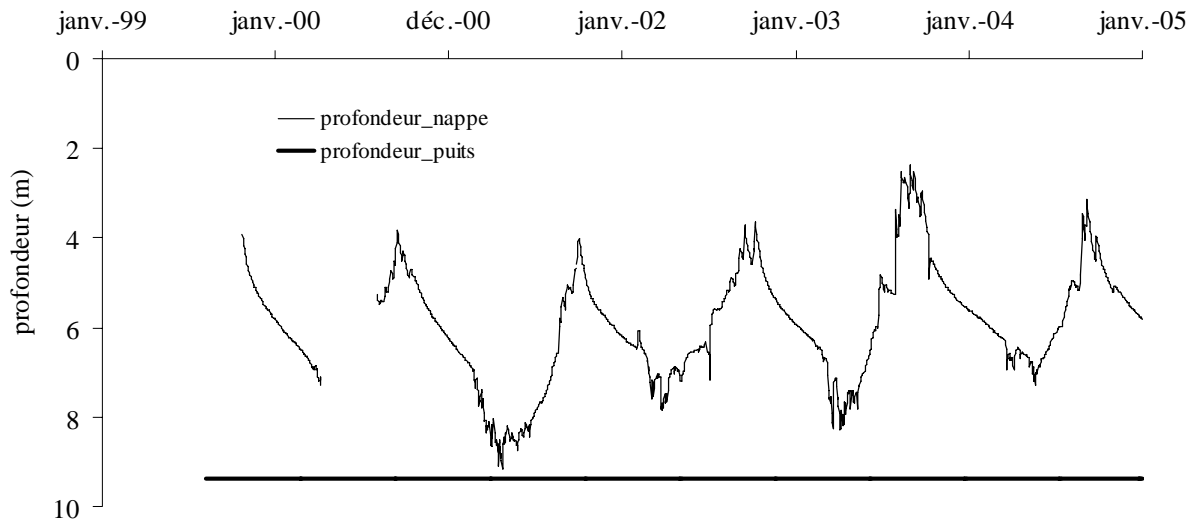


Figure 36 : Variation interannuelle de la piézométrie à la station de Djougou.

III.4.1.5- Relation pluie-recharge-vidange

À l'échelle de la station, les fluctuations piézométriques annuelles suivent strictement les saisonnalités pluviométriques énoncées précédemment (cf. III. 2). Mais ces fluctuations apparaissent très variables sur l'ensemble de la zone. L'impact de cette variabilité pluviométrique sur les amplitudes piézométriques interannuelles, individuelles à chacune des stations, apparaît très inégalement répartie. La station de Babayaka, unique poste situé en tête du bassin (fig. 29), semble être intensément influencée par cette variabilité annuelle de la pluviométrie (fig. 37A). Les dates du début de la hausse et celles du pic piézométrique et les amplitudes annuelles pour toutes les stations sont indiquées en annexe 8, 9 et 10. Le début de la remontée piézométrique pour l'ensemble des points de mesure, varie de mars à juin en 2002, d'avril à juin en 2003 et de mars à juillet en 2004. La réponse piézométrique à la recharge n'est donc pas synchrone dans le temps et sur l'ensemble du bassin. Des retards ou des anticipations dans la réception des premières eaux rechargeantes semblent donc exister. Le pic piézométrique est observé de septembre à octobre en 2002, de août à novembre en 2003 et de juillet à octobre en 2004. Tout comme le début de la hausse, la date du pic piézométrique apparaît très variable d'une année à une autre et sur l'ensemble de la zone. Ces paramètres dépendraient de la répartition temporelle des pluies rechargeantes. Mais outre la pluviométrie et certains paramètres envisageables (profondeur du puits et de captage, position topographique), ces variations d'amplitude peuvent être également interprétées comme résultant de variations locales de la porosité de l'aquifère sous l'effet d'une recharge directe par infiltration des précipitations. En accord avec les quelques données plus anciennes décrites précédemment et existant depuis 1984 sur le bassin, aucune tendance (à la hausse ou

à la baisse) à long terme ne peut être mise en évidence. Ceci concorde avec le très faible écart entre la recharge et la vidange annuelle de l'aquifère. En d'autre terme la vidange est toujours plus ou moins l'équivalent de la recharge.

À l'échelle de l'ensemble du bassin, supposant des comportements similaires des nappes d'altérite de versant, nous avons calculé une chronique de profondeur moyenne à partir du réseau des puits villageois (fig. 37B). L'analyse de cet indice piézométrique donne les grandes tendances saisonnières et inter-annuelles. La hausse piézométrique se produit toujours après les premières averses qui ne sont vraisemblablement pas rechargeantes. Mais le délai entre le début de la saison pluvieuse et la hausse piézométrique varie d'une année à une autre. Ces deux dates sont quasiment superposées en 2003, traduisant un nombre important d'averses rechargeantes en début de saison. Pour cette même année, le pic piézométrique semble précéder la fin de la saison pluvieuse. Ceci peut s'expliquer par un important contraste spatial dans le fonctionnement piézométrique de la nappe dû à la très forte variabilité spatiale de la pluviométrie et des paramètres hydrodynamiques. Tout comme pour Babayaka, la vidange du réservoir semble s'équilibrer avec la recharge.

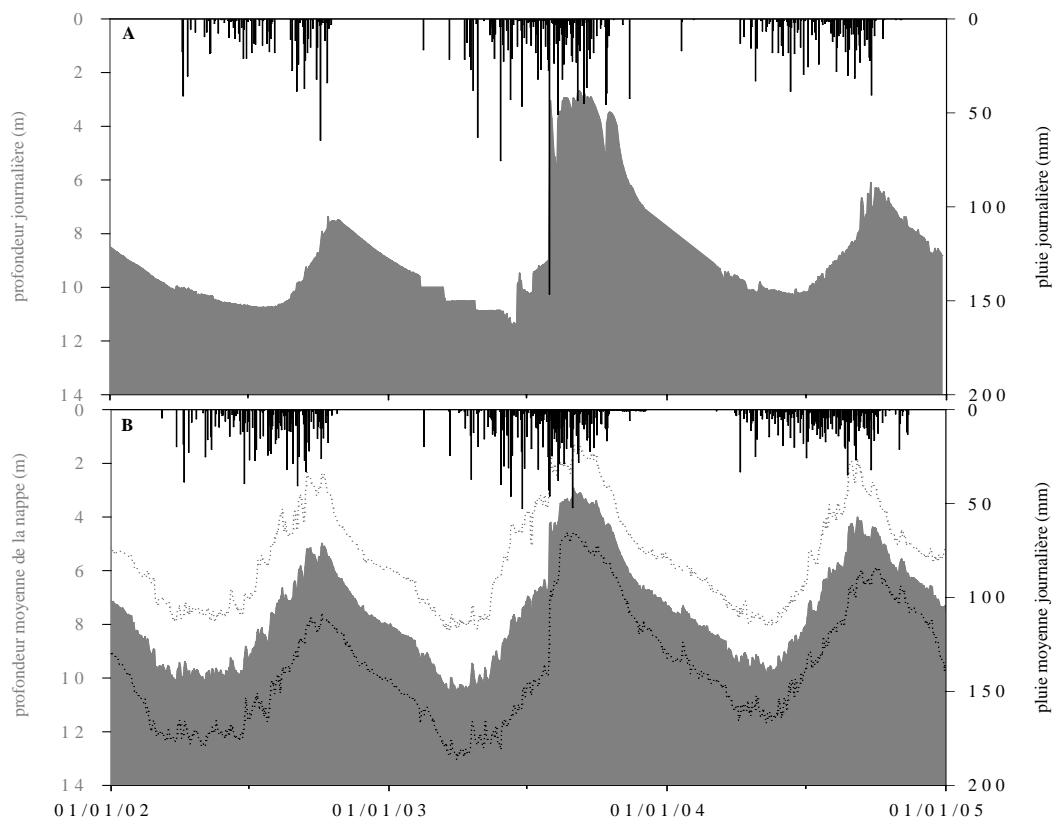


Figure 37 : Relation pluie-recharge-vidange. A : pluviométrie et piézométrie aux stations pluviométrique et piézométrique de Babayaka ; B : pluviométrie et piézométrie moyenne (\pm écart-type en pointillé) sur le bassin de la Donga en 2002, 2003 et 2004.

La vitesse de recharge annuelle de la nappe, principalement liée aux propriétés hydrodynamiques de l'aquifère, est donnée par l'amplitude piézométrique et la durée de la recharge. Sur l'ensemble du bassin, elle varie de 3 à 10 m.an⁻¹ en 2002, 3 à 12 m.an⁻¹ en 2003 et 2 à 10 m.an⁻¹ en 2004.

La variabilité interannuelle de la recharge peut être quantitativement approchée également par l'importance relative de l'amplitude piézométrique moyenne saisonnière (Crosbie *et al.*, 2005). Cette approximation suppose que la variabilité piézométrique est une image de la variabilité de l'infiltration. L'estimation de la recharge (R) par la méthode des fluctuations piézométriques suppose une nappe libre, rechargée par les précipitations en un temps court ; elle peut s'exprimer selon l'équation Éq. 3.

$$\text{Éq. 3} \quad R = h \times n$$

où h est l'amplitude piézométrique observée sur la période considérée et n la porosité efficace. Pour notre cas d'étude où la recharge s'effectue en quelques mois, l'amplitude piézométrique considérée est la valeur moyenne entre le minimum de saison sèche et le maximum de la saison des pluies. Mais l'estimation obtenue pour une valeur n considérée représente une estimation « a minima » de la recharge effective, du fait (1) d'une recharge concomitante à une vidange par évapotranspiration réelle et les drainages profonds éventuels et (2) d'une amplitude de fluctuation parfois limitée par le fond des puits. Au contraire les prélèvements peuvent augmenter légèrement cette amplitude. Pour quantifier l'impact du choix de n sur la recharge estimée, une gamme de 1 à 5% a été retenue pour la porosité efficace. La recharge est alors estimée de l'ordre de 45 à 225 mm.an⁻¹ en 2002, de 70 à 350 mm.an⁻¹ en 2003 et de 50 à 270 m.an⁻¹ en 2004. Les coefficients de recharge α (4 à 23 % du total pluviométrique, annexe 11) qui sont le rapport entre la recharge et la pluie annuelle, apparaissent relativement constants et compatibles avec les rares valeurs publiées pour des aquifères en zone de socle et sous climat soudanien (Filippi *et al.*, 1990). En valeur absolue, ces recharges apparaissent suffisamment faibles pour être compatibles avec des flux d'exfiltration par évapotranspiration et vidange vers le socle pendant les 5 à 6 mois de la saison sèche (fig. 38).

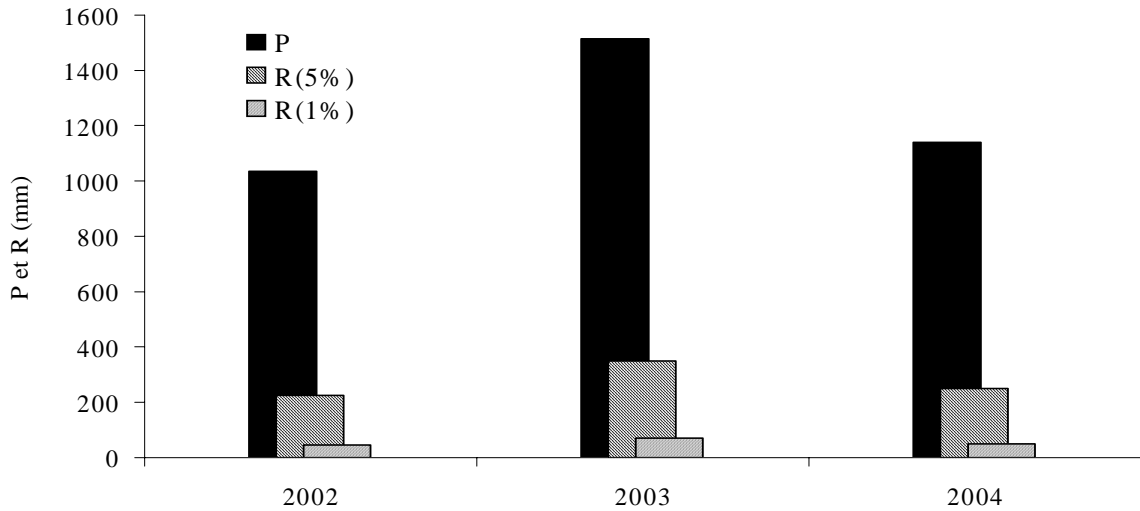


Figure 38 : P, la pluie annuelle et R(5%) et R(1%), la recharge annuelle avec respectivement des porosités fixes de 5 et 1 %.

III.4.2- Échelle du versant

L'étude piézométrique est reprise à l'échelle d'un versant pour une investigation renforcée.

III.4.2.1- Stations de mesure

Le versant est équipé de trois stations (fig. 39). Les piézomètres de 2 m de profondeur sont crépinés sur une hauteur de 1 m, ceux de 10 m sur 2 m et ceux de 20 m sur 4 m, à la base du forage.

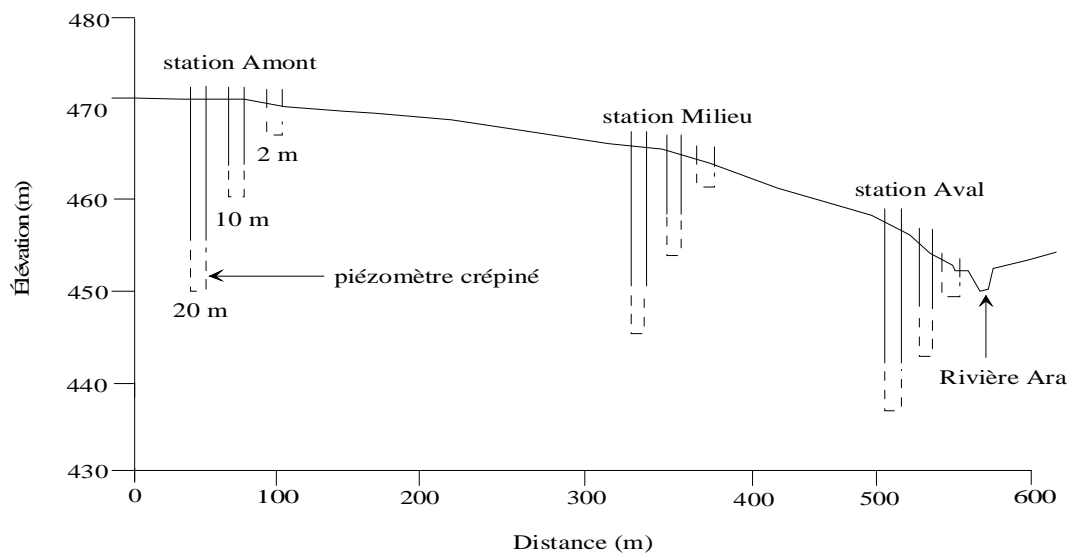


Figure 39 : Schéma d'équipement du versant piézométrique expérimental : 3 stations à 3 piézomètres chacune (2, 10 et 20 m).

III.4.2.2- Acquisition des données

La majeure partie des mesures piézométriques du versant expérimental est réalisée par un observateur villageois, recruté depuis la mise en place du site en avril 2004. Les mesures sont effectuées manuellement à la sonde. La fréquence de passage à toutes les stations est d'une fois tous les deux jours. Des mesures automatiques au pas de 15 mn, réalisées au moyen d'un capteur de pression CTD-Di (Van Essen) sont également disponibles mais uniquement pour les trois piézomètres de la station Amont. Ces deux types de données permettent de critiquer et de discuter de la représentativité des mesures.

III.4.2.3- Critiques et représentativité des relevés

La fréquence des lacunes dans les chroniques et la fiabilité des mesures sont toutes liées à la fois à la rigueur du lecteur et à sa présence effective sur le site. Plusieurs tests basés sur l'utilisation attentive de la sonde, la bonne notation des profondeurs lues, la prise en compte des observations particulières, notamment si la mesure est faite un jour de pluie, ont été concluants et ont justifié son recrutement. Aussi la rareté des lacunes dans les chroniques laissent-elles penser à son sérieux. Un autre test de la fiabilité des données est d'observer en parallèle les mesures réalisées par le lecteur et les mesures automatiques à la station où ce couple de mesure existe. Celles-ci apparaissent quasi identiques, avec un écart négligeable (fig. 40). Les données « lecteur » peuvent donc être considérées comme étant de bonne qualité.

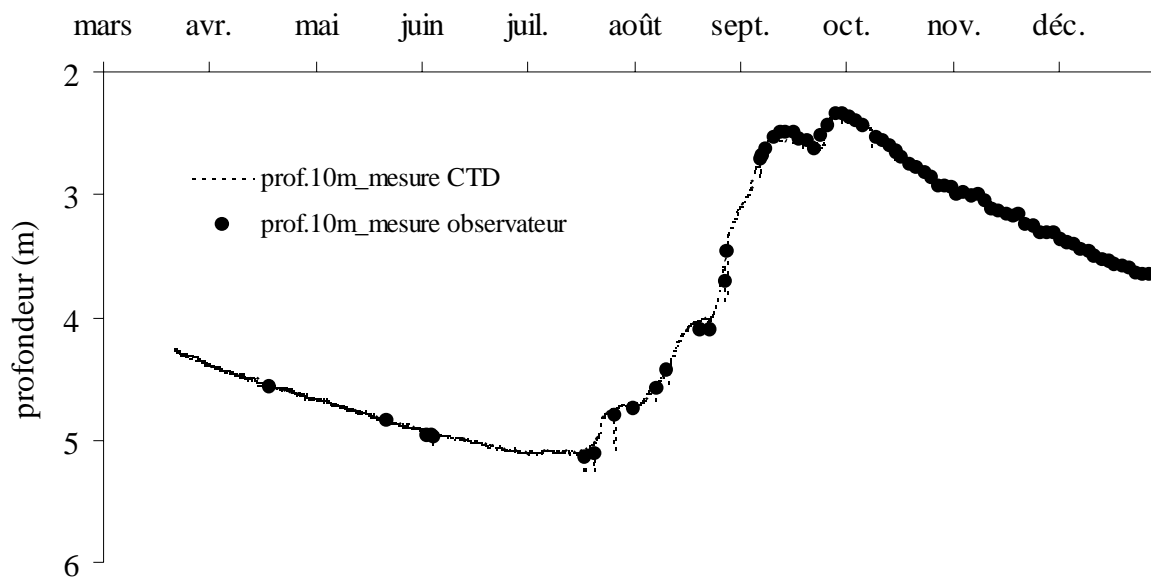


Figure 40 : Comparaison entre les mesures automatiques CTD et les mesures manuelles réalisées tous les deux jours par l'observateur villageois à la station Amont (10 m).

III.4.2.4- Fluctuations piézométriques

Les variations du niveau de la nappe libre à l'échelle du versant montrent deux niveaux piézométriques observables à toutes les stations. Le premier niveau est visible dans les piézomètres de 2 m de profondeur (fig. 41). Celui-ci semble être constitué de nappes temporaires à faible temps de résidence caractérisées par de très fortes variations, dues à la forte sensibilité de cet horizon très superficiel aux précipitations. En 2004, la mise en place de cette nappe s'est faite au début du mois d'août 2004 aux trois stations. Après un pic observable à la fin du même mois, une vidange s'en suit jusqu'à tarissement à la mi-octobre aux stations Amont et Milieu et au début de l'année 2005 à la station Aval. Ce fonctionnement traduit à la fois une très forte relation entre les flux de 2 m et la saison pluvieuse et un probable drainage latéral des flux vers le bas du versant où une accumulation tendant à maintenir longtemps l'eau se produit. Cette accumulation pourrait être accentuée suite à une forte présence dans l'horizon de 2 m de la station Aval de montmorillonite (argile gonflante) à capacité de rétention d'eau plus importante.

Le deuxième niveau, pérenne, est celui capté par les forages de 10 et 20 m de profondeur. Une fluctuation identique (hausse suivie de baisse) se dégage aux trois stations, en accord avec les fluctuations observées sur l'ensemble du bassin. Mais ici le niveau d'eau dans les 20 m est toujours inférieur à celui des 10 m. L'écart piézométrique entre ces deux profondeurs apparaît plus faible en Amont et en Aval (en moyenne 10 cm) alors qu'il est plus important au Milieu (en moyenne 50 cm). L'explication la plus probable pourrait provenir des observations géophysiques qui indiquent une forte remontée du socle au niveau de la station Milieu (fig. 15) pouvant provoquer un décrochage des niveaux 10 et 20 m.

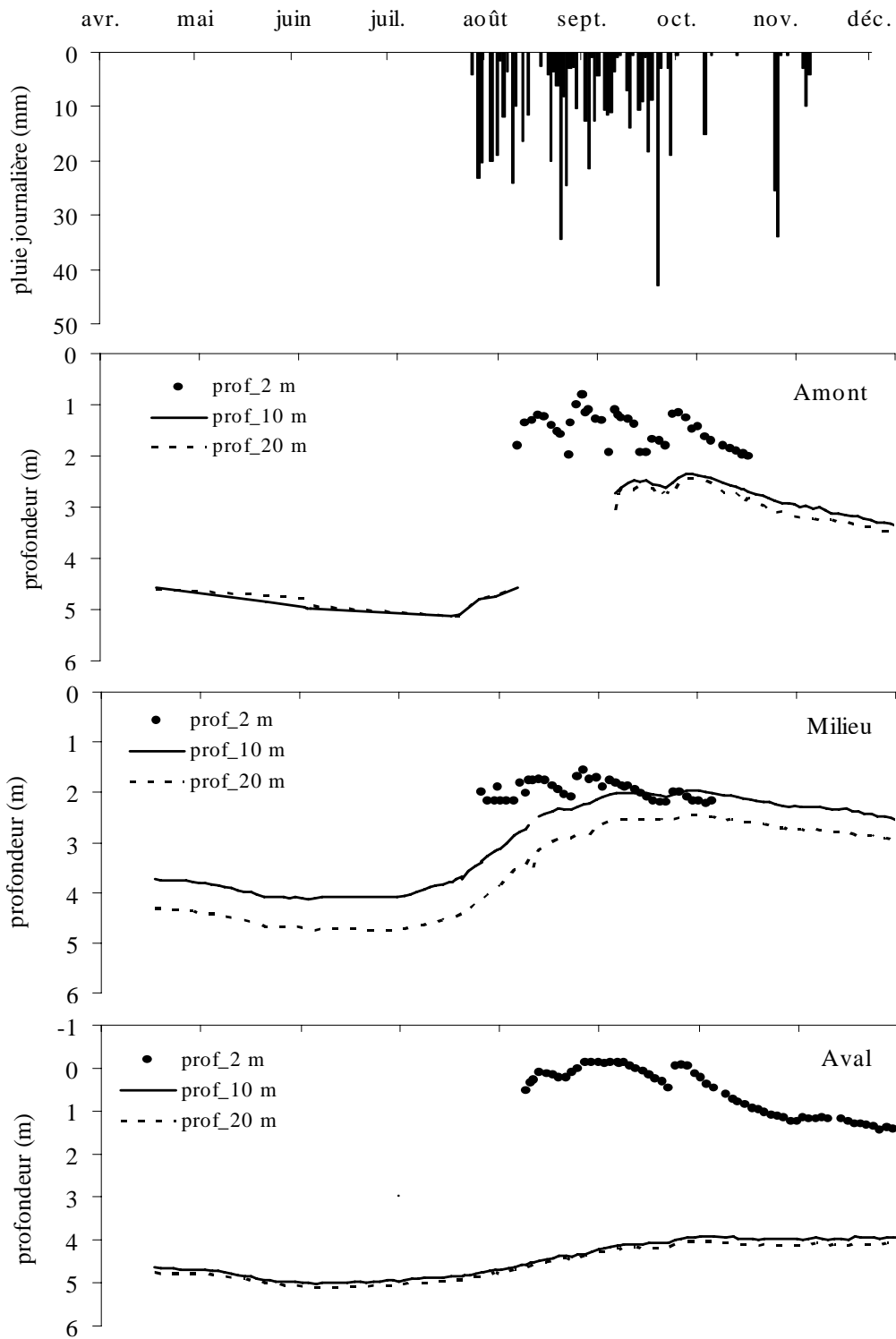


Figure 41 : Pluie journalière (pluviographe de Nalohou 2) et niveau de la nappe phréatique aux stations Amont, Milieu et Aval (2, 10 et 20 m) en 2004.

III.4.2.5- Relation pluie-recharge-vidange

La recharge de la nappe apparaît fortement liée à la pluviométrie. L'amplitude de recharge d'environ 2,5 m en deux mois, est presque identique en Amont et au Milieu alors

qu'elle est de l'ordre de 1 m en deux mois en Aval (fig. 41). L'estimation de la recharge reprend la méthode employée pour l'ensemble du bassin (annexe 12 et 13). Du fait que les piézomètres de 2 m de profondeur captent des flux intermittents, une estimation de la recharge pour cet horizon ne paraît pas pertinente (zone non saturée ?), la recharge traduisant une arrivée d'eau dans des réservoirs pérennes. En accord avec les vitesses, la recharge apparaît plus importante et comparable en Amont et Milieu contrairement à la station Aval (fig. 42). Ceci pourrait être lié à un potentiel imposé plus en aval du versant qui limiterait les fluctuations. Une différence de paramètres hydrodynamiques, notamment la transmissivité, pourrait également être mise en cause. Pour les deux premières stations, c'est la transmissivité verticale qui prédominerait sur la transmissivité latérale, tandis que c'est le contraire pour la troisième station. En outre, ces valeurs de recharge apparaissent significativement inférieures (10 à 140 mm/an) à celles de l'ensemble du bassin pour la même année 2004 (50 à 250 mm/an). Ceci pourrait être lié d'une part au choix de la porosité, considérée comme constante sur l'ensemble du bassin faute de valeurs de référence et d'autre part à l'absence de prélèvements rabattant localement la nappe au niveau des puits villageois.

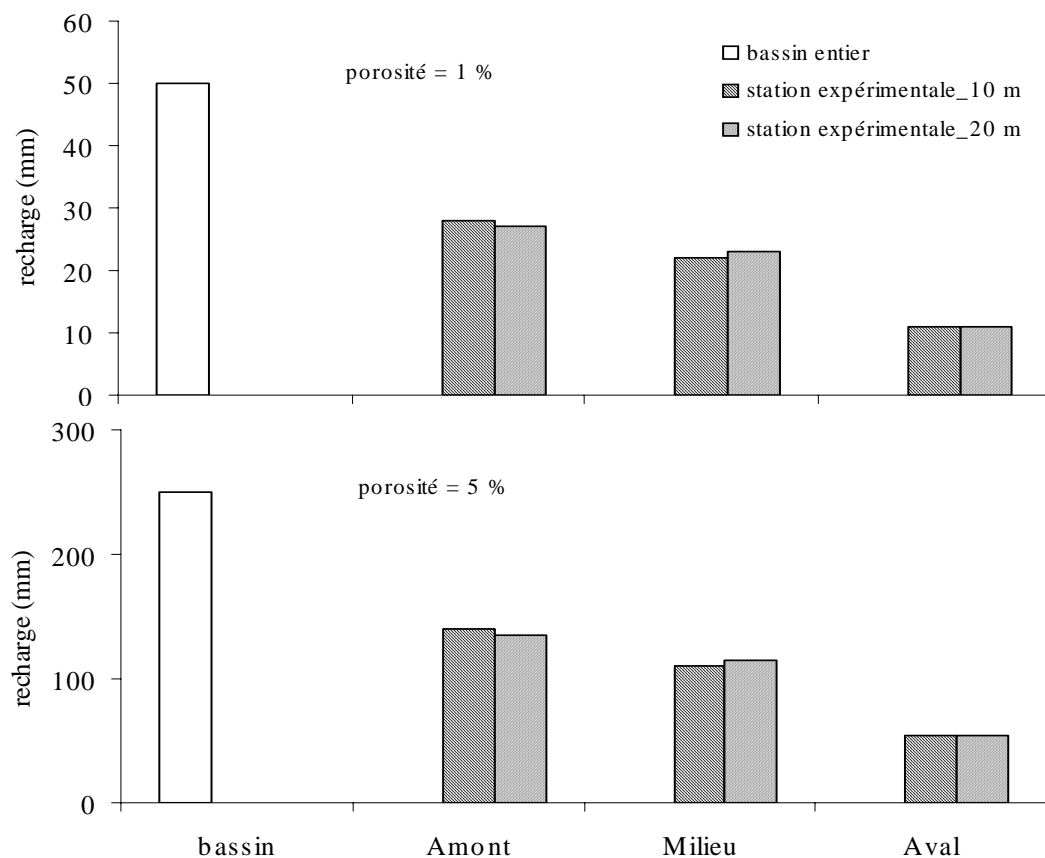


Figure 42 : Recharge sur l'ensemble du bassin et aux stations expérimentales (Amont, Milieu et Aval, profondeurs : 10 et 20 m) pour des porosités fixes de 1 et 5 %.

III.4.3- Conclusion

Les niveaux de la nappe libre, caractérisés par une fluctuation saisonnière à forte variabilité de la recharge (recharge de type direct), sont compris en moyenne entre 10 m en saison sèche et 3 m en saison des pluies. Le maximum piézométrique de la nappe phréatique est atteint en août-septembre, après une hausse plurimétrique des niveaux, sans répartition particulière des amplitudes de fluctuation sur le bassin. La décrue piézométrique s'amorce dès la fin de l'occurrence des précipitations pour atteindre un minimum en mai-juin. La nappe phréatique apparaît donc de dynamique synchrone à l'échelle du bassin. Cette observation est également valable à l'échelle d'un versant plus finement équipé à l'amont du bassin, sur le bassin d'Ara. Sur ce site, les piézomètres crépinés à 10 et 20 m montrent une même piézométrie (nappe phréatique pérenne des altérites) tandis que ceux crépinés à 2 m captent un niveau saturé à potentiel plus élevé (nappe perchée temporaire ?). Sur les 3 années d'observation, la vidange annuelle semble équilibrer la recharge. On n'observe pas de tendance pluri-annuelle à la hausse ou à la baisse.

III.5- Hydrométrie

La problématique de l'origine des écoulements de surface est au centre des questions posées dans le cadre de cette étude. Avec les précipitations, l'évapotranspiration et les flux souterrains, les écoulements se positionnent comme le dernier terme à étudier dans le bilan hydrologique du bassin.

III.5.1- Réseau hydrométrique

Le réseau hydrométrique du bassin de la Donga s'inscrit dans le grand réseau de l'observatoire hydrométéorologique de la haute vallée de l'Ouémé (OHHVO, fig. 2) tout comme les réseaux pluviométrique et piézométrique. Trois stations, équipées chacune de limnigraphe (*Thalymedes* comme sur les puits villageois) et d'échelle de crue et ayant fait l'objet d'un nivellement au GPS différentiel (Kamagaté *et al.*, 2003) constituent le réseau hydrométrique considéré (fig. 43). Les caractéristiques des stations (coordonnées, date d'installation et le type d'appareil de mesure) sont indiquées en annexe 14.

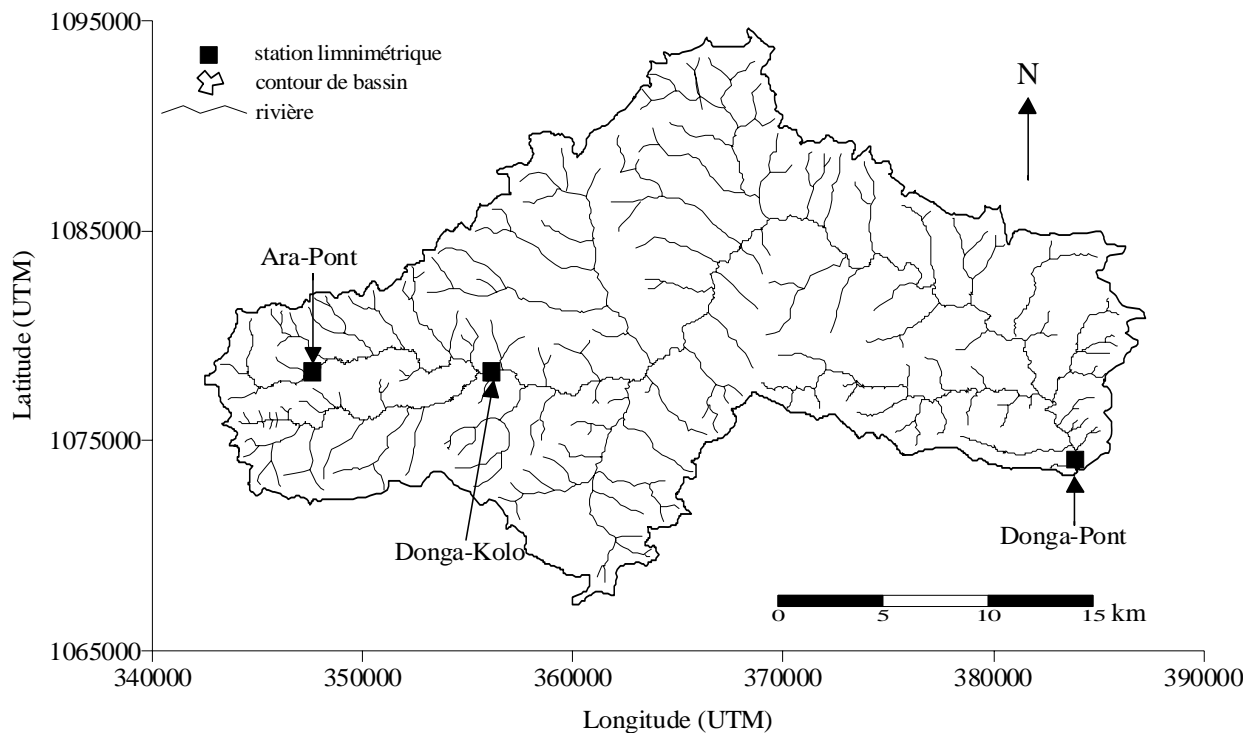


Figure 43 : Stations hydrométriques sur le bassin de la Donga.

III.5.2- Acquisition et critique des données

Deux types de mesures limnimétriques brutes sont réalisés aux différentes stations hydrométriques tout comme les mesures piézométriques. Les mesures « enregistreurs » sont des mesures de hauteurs d'eau effectuées au moyen de limnigraphes enregistreurs automatiques dont la cadence de scrutation et de mémorisation peut être variable (de 5 min à plus d'une heure). Les mesures « lecteurs » sont réalisées journalièrement ou 2 fois par jour par des lecteurs villageois. Celles-ci ont servi à compléter des lacunes observées dans les mesures automatiques ou à corriger des décalages et des inversions de poulies. Ces deux types de données ont été critiqués, complétés et éventuellement corrigés (Thévenot *et al.*, 2004).

Plusieurs campagnes de jaugeage ont été réalisées, aussi bien au moyen de moulinet (notamment pour les écoulements de base) qu'au moyen d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profilometer). Les données de ces campagnes ont été analysées par Le Lay et Galle (2005). Ceci a permis de dégager avec précision les sections en travers ainsi que les courbes de tarage permettant de déduire les débits écoulés.

III.5.3- Lames écoulées

À l'instar des mesures pluviométriques, les mesures hydrométriques ont commencé en 2002 pour les stations d'Ara-Pont et Donga-Kolo. Mais une chronique plus

longue existe à la station de Donga-Pont depuis 1998 (fig. 44). Celle-ci permet non seulement d'avoir une vue d'ensemble des fluctuations saisonnières à l'échelle du bassin mais aussi de situer notre fenêtre d'étude par rapport aux écoulements antérieurs. Les écoulements débutent véritablement à la mi-juin et prennent fin au début du mois de novembre avec une dynamique rapide. Les années 2002 et 2004 présentent les plus faibles écoulements de la chronique en accord avec la pluviométrie de ces deux années. Les débits maximums instantanés enregistrés sont respectivement de 55 et 51 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. L'année 2003 a connu une pluviométrie fortement excédentaire. Ceci a engendré des écoulements de surface plus importants. Le débit maximum enregistré est le plus fort de toute la chronique (150 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$). Ainsi l'étude des débits portera sur deux années à écoulement déficitaire séparées d'une année à fort écoulement.

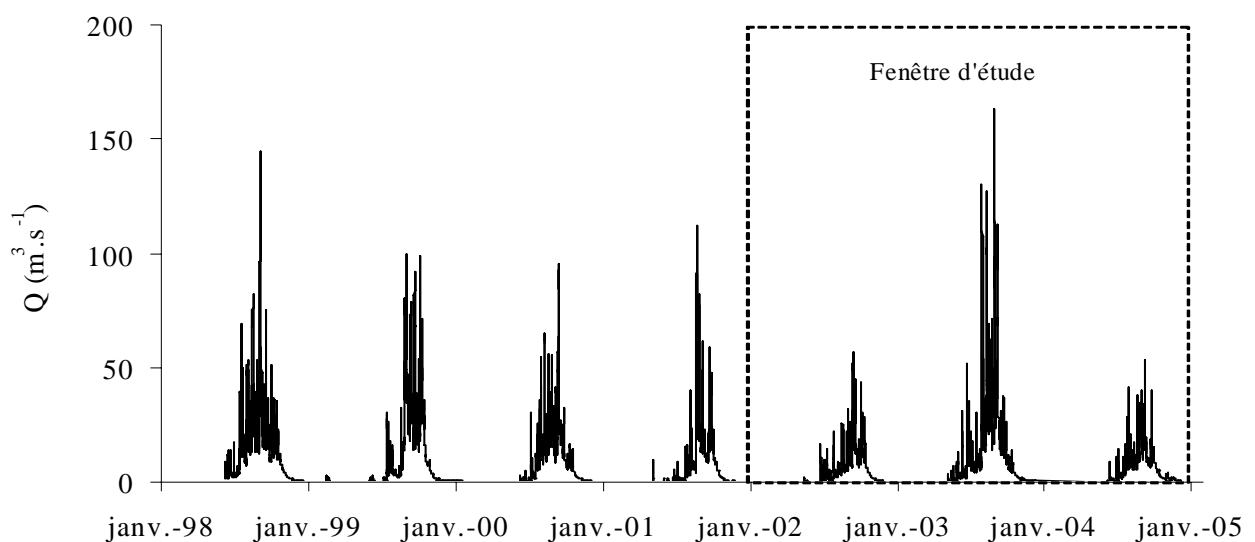


Figure 44 : Débit instantané à l'exutoire du bassin de la Donga (Donga-Pont) de 1998 à 2004 et fenêtre d'étude.

Lames annuelles : les lames annuelles écoulées sur chaque sous-bassin et les coefficients d'écoulement sont indiqués dans le tableau 6. Les coefficients d'écoulement exprimant l'aptitude du bassin à produire du ruissellement apparaissent plus faibles pour les deux années sèches contrairement à l'année plus humide (environ du simple au double). Par année, ils ne montrent pas de différences importantes en passant du plus petit au plus grand bassin. L'effet d'échelle qui consiste généralement en une diminution du coefficient d'écoulement avec l'augmentation de la superficie drainée semble donc peu marqué.

	2002			2003			2004		
	Lp	Le	α	Lp	Le	α	Lp	Le	A
Ara-Pont	1009	109	0,11	1634	480	0,29	1066	158	0,15
Donga-Kolo	1052	147	0,14	1580	437	0,28	1095	106	0,10
Donga-Pont	1036	150	0,14	1514	429	0,28	1140	156	0,14

Tableau 6 : Coefficient d'écoulement annuel α (Le/Lp) sur les 3 bassins pour les années 2002, 2003 et 2004 ; Lp = lame précipitée (mm) et Le = lame écoulee (mm).

Lames mensuelles : les lames mensuelles drainées varient de 0 à 200 mm sur l'ensemble du bassin, toutes années confondues. De façon générale, les écoulements semblent véritablement démarrer aux mois de mai-juin lorsque le total pluviométrique excède 100 mm sur tous les trois bassins (fig. 45). Une augmentation des écoulements s'en suit jusqu'au maximum, généralement en août-septembre.

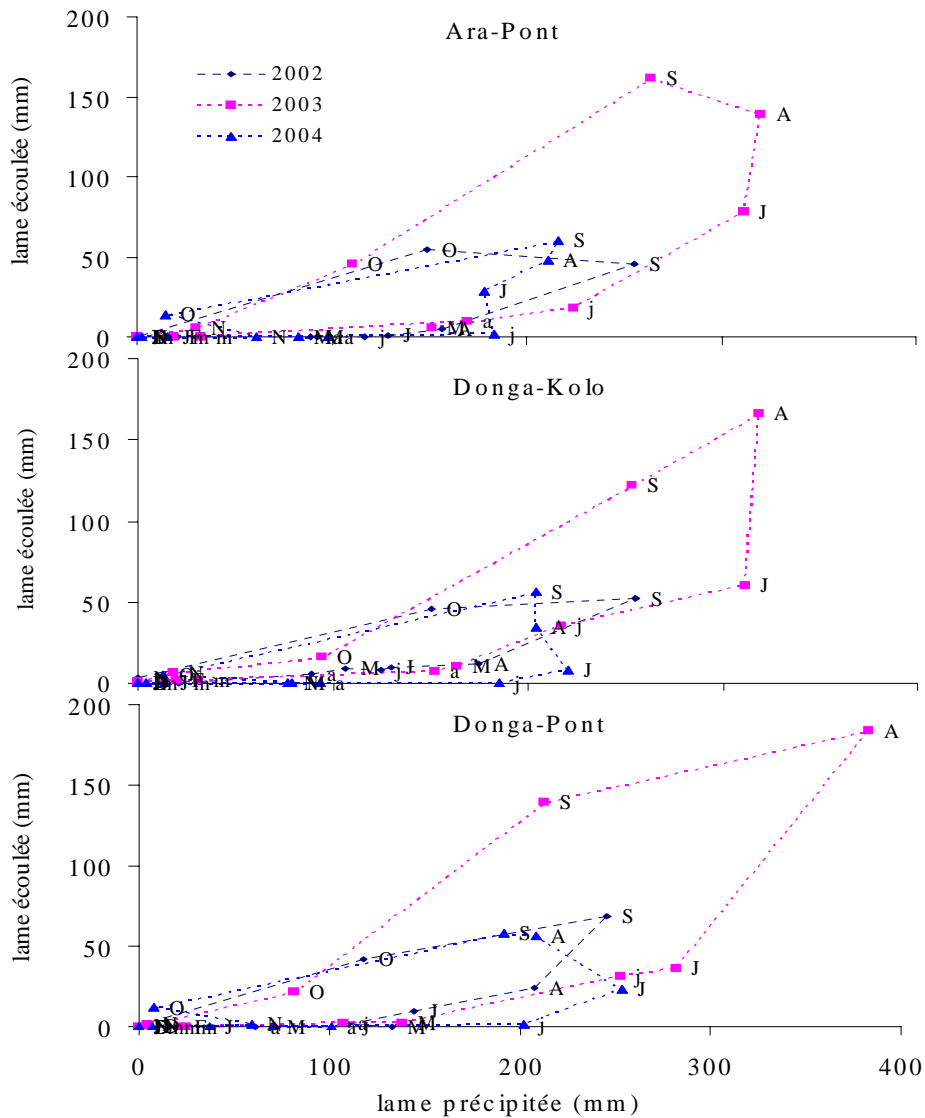


Figure 45 : Lames mensuelles drainées et précipitées sur chaque sous-bassin en 2002, 2003 et 2004 (a = avril, A = août, j = juin et J = juillet).

On constate des coefficients d'écoulement supérieurs à 1 pour les deux stations aval en fin de saison (fig. 46). Ils marquent la vidange des stocks sur le bassin alors qu'il ne pleut plus. En tête du bassin (Ara-Pont), cette vidange a lieu en septembre-octobre alors que sur les bassins plus grands elle dure jusqu'en novembre-octobre.

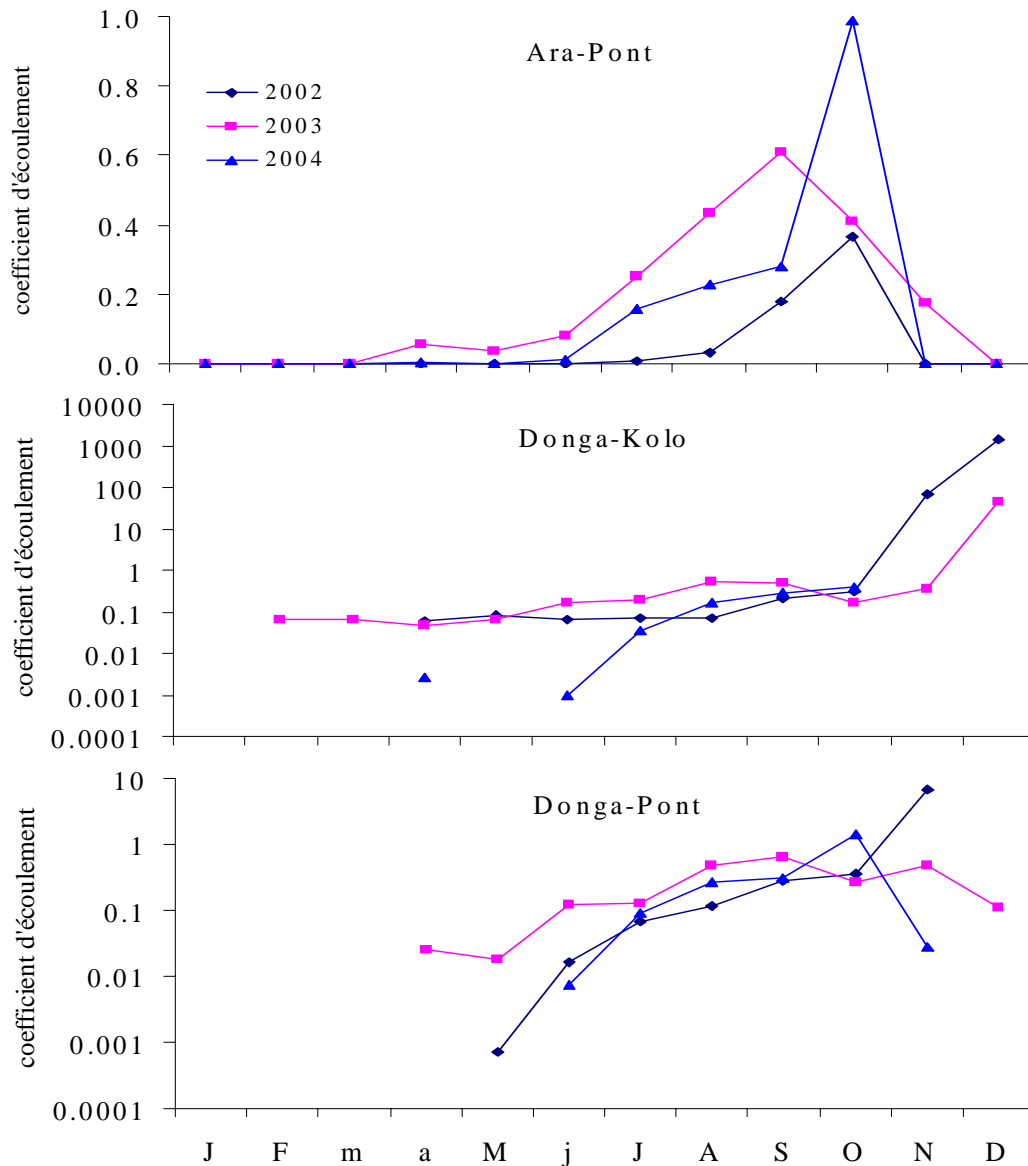


Figure 46 : Coefficient d'écoulement α (L_e/L_p) mensuels sur les 3 bassins pour les années 2002, 2003 et 2004 ; L_p = lame précipitée (mm) et L_e = lame écoulee (mm).

Lames journalières : l'étude journalière des écoulements, notamment du point de vue de la relation entre les lames écoulées et celles précipitées, porte sur la variation au cours de l'année, des cumuls de valeurs journalières (fig. 47).

En 2002, les premiers écoulements à l'exutoire du bassin sont enregistrés au 135^{ième} jour lorsque le cumul pluviométrique atteint 138 mm. Une faible variation est ensuite observée jusqu'au 200^{ième} jour. Cette date marque le début d'une croissance de type exponentiel qui s'étend au 314^{ième} jour lorsque l'écoulement cumulé atteint 1014 mm (pluie cumulée de 1035 mm). Dès lors, une constance des cumuls s'en suit du fait de la fin simultanée des écoulements et des pluies.

En 2003, le début des écoulements est observé au 110^{ième} jour pour une pluie cumulée de 114 mm. A la différence de 2002, la période de faible variation après les premiers écoulements est plus faible (55 jours contre 165). Une évolution exponentielle positive, plus importante que celle de 2002, s'en suit jusqu'au 300^{ième} jour pour un écoulement cumulé de l'ordre de 2886 mm (pluie cumulée de 2975 mm). Les écoulements cessent quand les pluies s'arrêtent.

En 2004, le 164^{ième} jour marque le début des écoulements lorsqu'on enregistre un cumul pluviométrique de 313 mm. Le début des écoulements et les cumuls pluviométriques nécessaires à la production des premiers écoulements apparaît donc très variables d'une année à l'autre. En revanche la période de faible variation de l'écoulement en 2004 apparaît identique à celle de 2002. Après la phase de croissance exponentielle, l'écoulement cumulé en 2004 avoisine celui de 2002.

Avant les premiers écoulements, le bassin était à son état de plus faible saturation. Le cumul pluviométrique de cette période pourrait alors favoriser une saturation progressive. La première phase de l'évolution des écoulements, caractérisée par une faible variation, serait le fait de la part des averses qui ne contribueraient pas directement à la saturation du bassin, notamment le ruissellement direct. La phase exponentielle de l'évolution des écoulements, correspondant à des cumuls pluviométriques plus importants, pourrait impliquer une contribution combinée de flux directs et de flux retardés du fait d'une importante saturation du bassin. La dernière phase, marquée par une stabilisation à la fois du cumul des écoulements et du cumul pluviométrique du fait de très faibles averses ou même d'une absence d'averses, pourrait traduire la vidange du bassin. La part du ruissellement direct est donc très faible pendant cette période au profit des flux retardés transitant par les réservoirs souterrains.

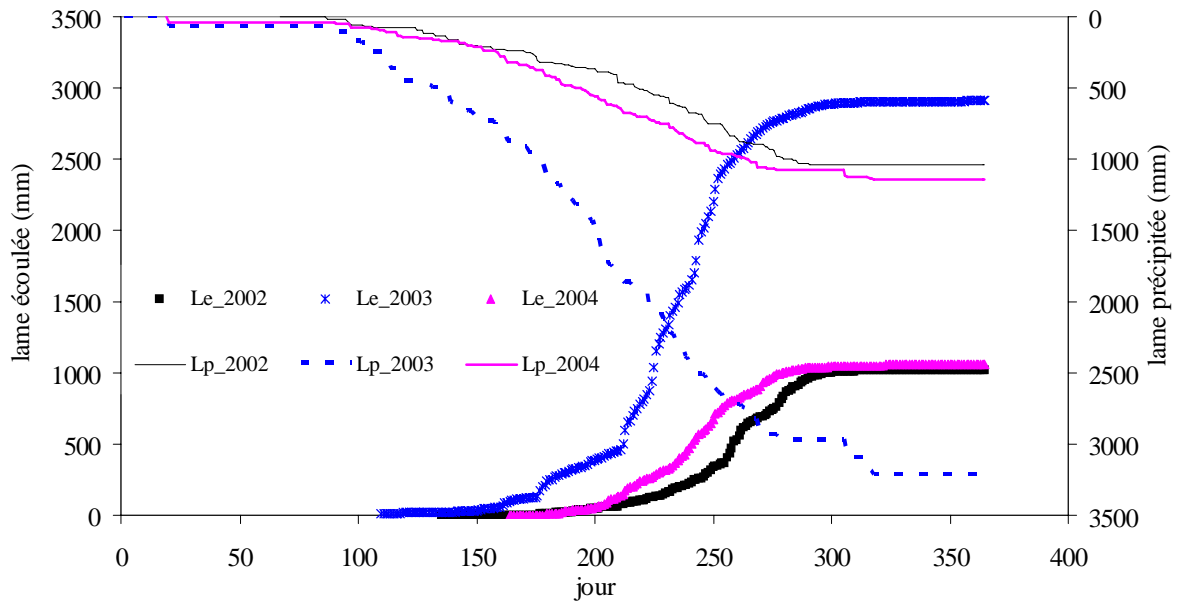


Figure 47 : Lames journalières cumulées, précipitées (Lp) et écoulées (Le) sur le bassin de la Donga (station de Donga-Pont) en 2002, 2003 et 2004.

Nous avons reporté sur la figure 48 les écoulements correspondants à chaque pluie en 2003. À hauteur égale, on constate que les pluies de fin de saison produisent davantage d'écoulement que celles de début de saison. Ceci est dû à la saturation progressive du bassin avec l'avancée de la saison des pluies.

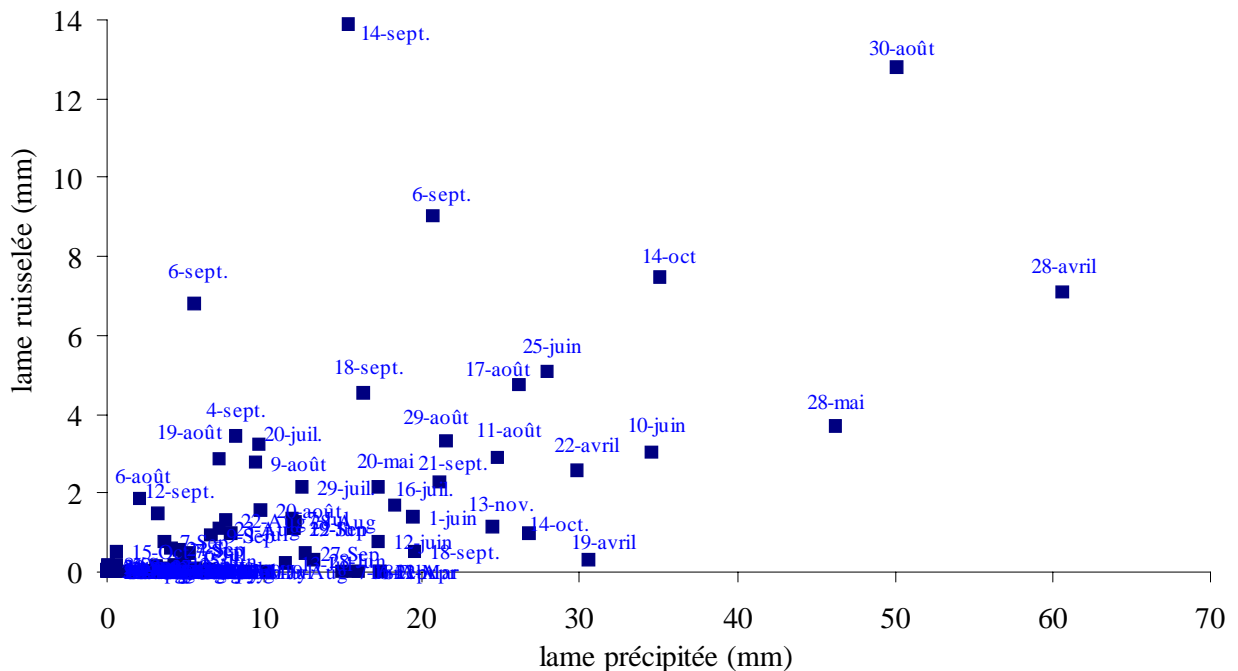


Figure 48 : Lames précipitées et drainées par le bassin versant d'Ara en 2003.

III.5.4- Écoulement de base et tarissement

L'étude du tarissement permet d'aborder les débits de base. Dans certains cas, le tarissement peut être évalué dès que l'intervalle séparant deux averses devient suffisamment long pour que l'on observe la vidange dans le réseau hydrographique des réserves souterraines. Mais du fait de la multiplicité des événements de crues dans les hydrogrammes, il apparaît très complexe de définir un débit de base en pleine saison pluvieuse (fig. 49).

On observe des périodes au cours desquelles le débit ne s'annule jamais (débit $Q \neq 0 \text{ m}^3/\text{s}$), même en dehors des crues. Cette période dure environ 4 à 5 mois à Donga-Pont, 3 mois à Donga-Kolo et 2 à 3 mois à Ara-Pont, toutes années confondues. Cette période augmente donc avec la taille du bassin. L'écoulement dans les rivières est formé d'un mélange d'eau de ruissellement direct et de flux souterrains pendant cette période. Au contraire, avant cette période de « hautes eaux », l'écoulement serait davantage dominé par le ruissellement direct et rapide avec annulation régulière du débit. L'aquifère ne semble pas avoir des transmissivités suffisantes pour permettre des flux significatifs vers le réseau de drainage.

Après la période de « hautes eaux » démarre le processus de tarissement des rivières. Le débit évolue de façon exponentielle décroissante et la part des réservoirs souterrains devient maximale. Mais l'étude de ce phénomène concerne uniquement la fin de la saison humide où l'on n'enregistre plus d'événements pluvieux (fig. 49).

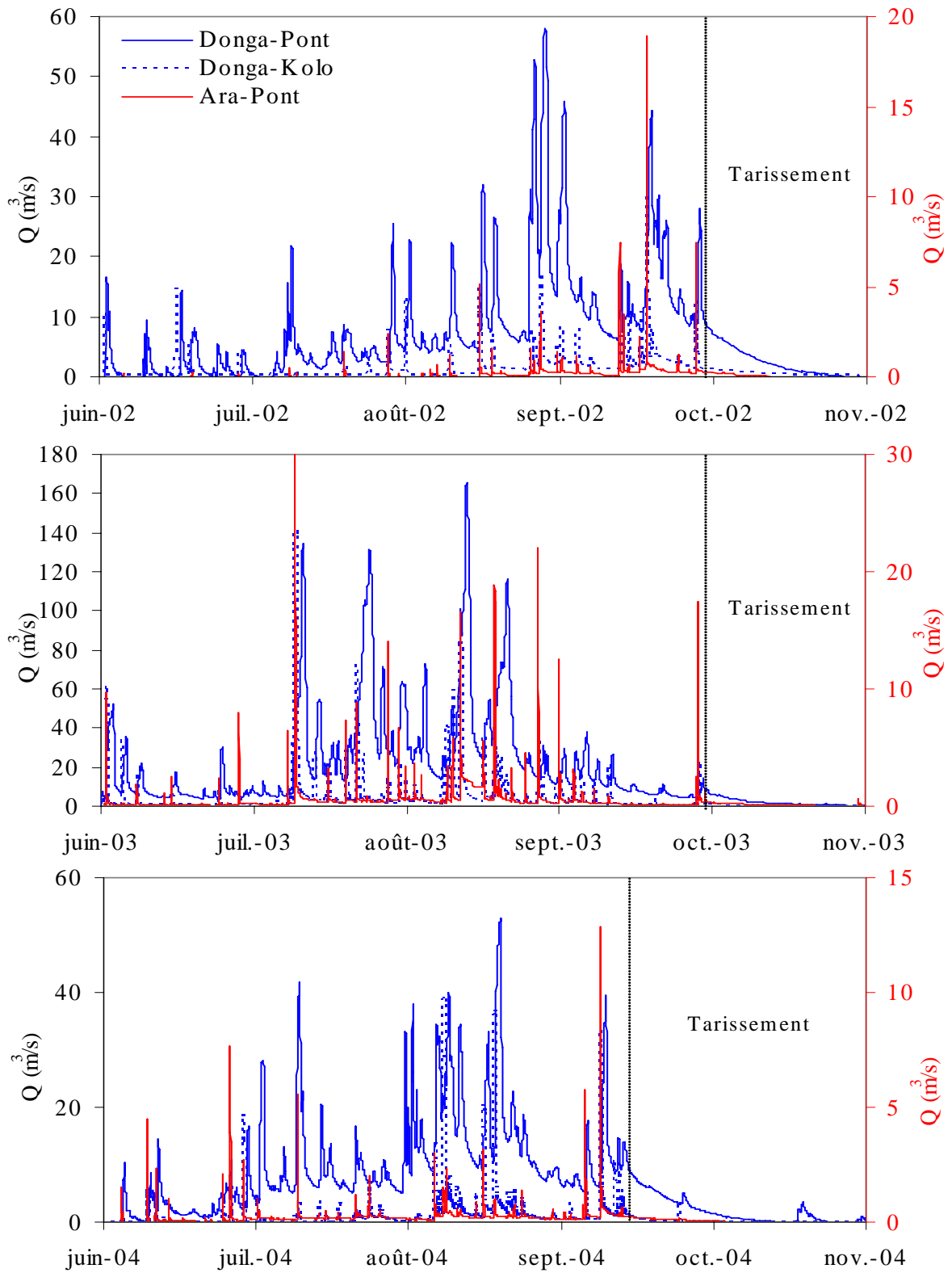


Figure 49 : Hydrogramme enregistré à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont en 2002, 2003 et 2004.

Pour le calcul du tarissement plusieurs formules existent mais nous utilisons ici celle de Maillet (Éq 4) :

$$\text{Éq. 4} \quad Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

Q_0 est le débit au début du tarissement, t est le temps en jours séparant Q_0 et Q_t et α le coefficient de tarissement. Les paramètres (dates de début et fin du tarissement, débits de début et fin du tarissement) ayant servi au calcul sont indiqués en annexe 15, 16 et 17.

Les valeurs des coefficients de tarissement sont indiquées dans le tableau 7. Une baisse importante des valeurs d'amont en aval du bassin se dessine pour 2002 et 2003. Les valeurs de 2004 apparaissent difficiles à interpréter.

Les observations de terrain ont montré un tarissement de plus en plus faible des rivières d'amont en aval du bassin. L'importance des coefficients de tarissement devrait donc suivre ce même ordre. Les plus petites rivières s'assèchent logiquement le plus rapidement. Par ailleurs, ces valeurs de coefficient de tarissement sont comparables à celles obtenues par Mahé *et al.* (2000) sur le bassin du Bani au Mali.

Station	Coefficient de tarissement 2002 (j ⁻¹)	Coefficient de tarissement 2003 (j ⁻¹)	Coefficient de tarissement 2004 (j ⁻¹)
Ara-Pont	0,19	0,11	0,28
Donga-Kolo	0,09	0,05	0,13
Donga-Pont	0,07	0,03	0,11

Tableau 7 : Caractéristiques des écoulements et du tarissement sur le bassin versant de la Donga et de ses deux sous-bassins (Ara et Donga-Kolo) en 2002, 2003 et 2004.

III.5.5- Conclusion

Les écoulements présentent la même saisonnalité que la pluviométrie. Les coefficients d'écoulement annuels passent du simple au double, des années sèches (environ 13 %) à l'année humide (environ 28 %) sans effet d'échelle spatiale. En terme de processus, l'écoulement présente une dynamique rapide, avec des crues journalières pouvant atteindre 150 m³.s⁻¹. À l'échelle saisonnière, la durée de l'écoulement augmente avec la taille du bassin. La vidange des stocks sur le bassin s'achève plutôt en amont, en septembre-octobre, alors qu'il dure jusqu'en octobre-novembre en aval, bien après la fin des pluies.

III.6- Synthèse et fonctionnement hydrologique

Sur les trois bassins, une augmentation de la pluie annuelle de 50 % environ (d'une année sèche à une année humide) entraîne un doublement des coefficients d'écoulement annuels. L'écoulement présente une dynamique rapide, avec des crues pointues (fig. 50B). Après un maximum piézométrique atteint en août-septembre suite à une hausse des niveaux (fig. 50C), la décrue piézométrique s'amorce dès la fin de l'occurrence des précipitations régulières pour atteindre un minimum en mai-juin. Les écoulements débutent alors que la nappe est à l'étiage et les rivières s'assèchent quand la nappe est toujours en position haute.

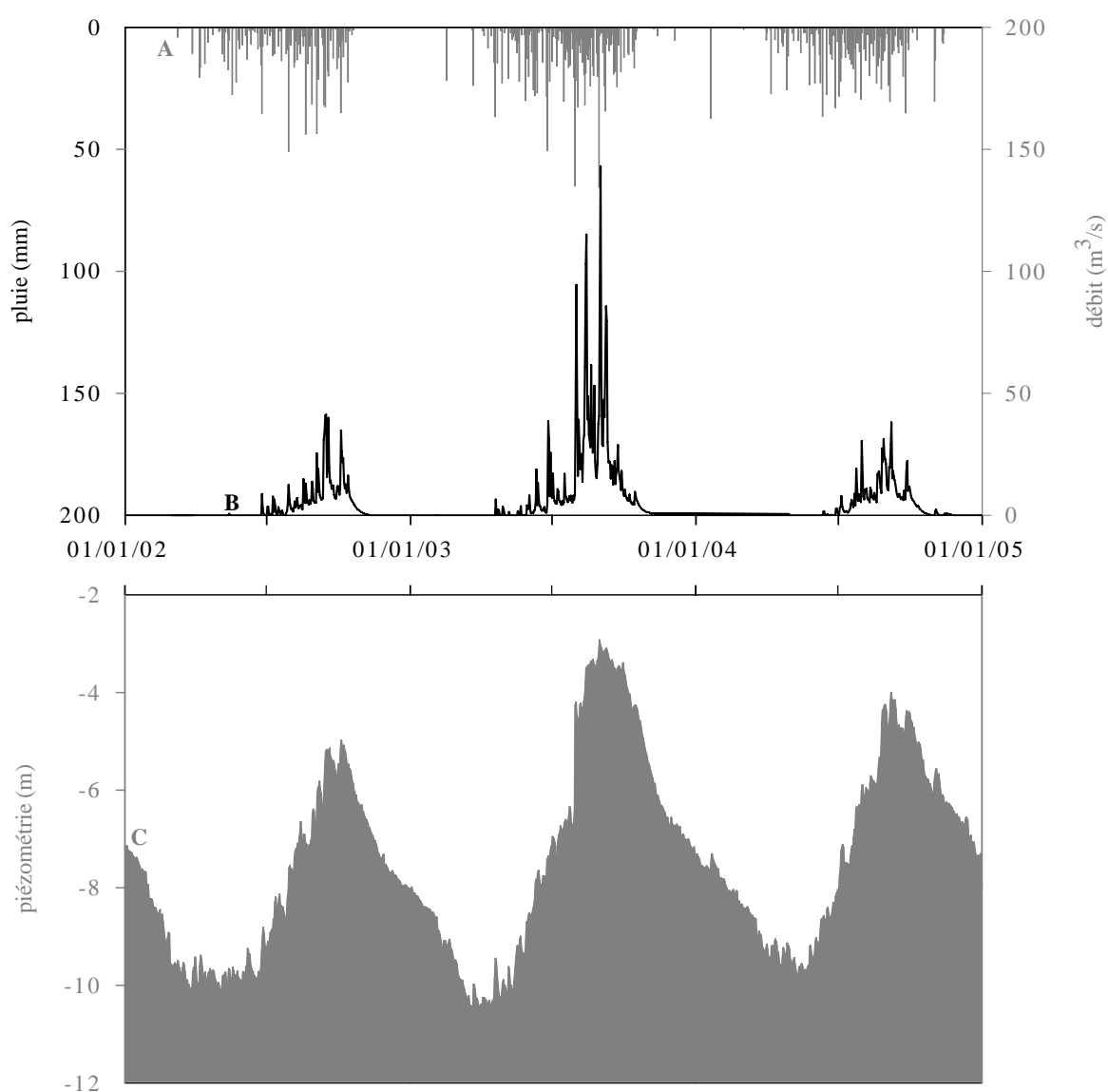


Figure 50 : Lames journalières précipitées (A), lames journalières écoulées à l'exutoire du bassin (B) et profondeur moyenne journalière de la nappe (C) pour les années 2002, 2003 et 2004.

Le croisement de toutes ces informations hydrodynamiques permet de reconstituer un schéma cohérent des processus mis en jeu sur le bassin. Le caractère temporaire des eaux de surface ainsi que la désynchronisation entre le tarissement des rivières et la vidange des nappes pérennes milite pour une origine superficielle des écoulements (fig. 51).

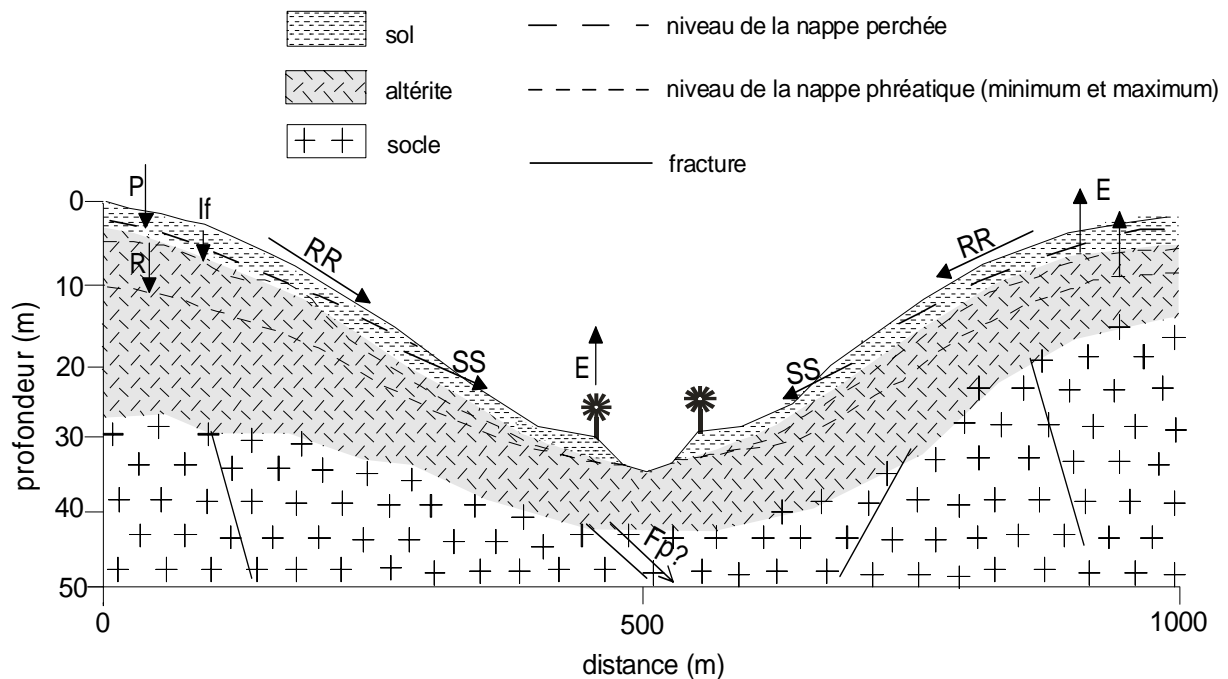


Figure 51 : Schéma type de fonctionnement de versant sur le bassin de la Donga. P est la pluie, E est l'évapotranspiration, RR est le ruissellement direct, SS est l'écoulement de subsurface et Fp le flux profond.

Sur le site d'investigation renforcée à l'amont du bassin, l'existence de nappe perchée saisonnière à 2 m de profondeur concorde avec l'émergence d'écoulements de subsurface en de multiples points du bassin lors de la saison pluvieuse (fig. 52). Selon ce schéma, le débit à l'exutoire est considéré comme composé d'un flux rapide (ruissellement) et d'un flux retardé de sub-surface (nappe perchée saisonnière), sans contribution significative de la nappe des altérites à l'écoulement. La vidange de la nappe profonde semblerait donc s'effectuer essentiellement par des transferts verticaux, par évapotranspiration (strate arborée) et/ou plus localement, vers des fractures du socle en profondeur.



Figure 52 : Écoulement de subsurface sur le bassin d'Ara (long. : 1.6639° E, lat. : 9.7622° N, août 2003).

Le déficit d'écoulement est la part de la pluie qui ne transite pas par l'exhaure naturel du bassin durant une année hydrologique (fig. 53). D'une année sèche à l'année humide, ce déficit varie du simple (15%) au double (30%). Les observations piézométriques ont indiqué une variation quasi nulle du stockage d'eau annuel dans les réservoirs souterrains. Le déficit pluviométrique pourrait donc être associé aux prélèvements verticaux par la strate arborée et l'évaporation alors que l'éventualité d'une orientation des flux vers les fractures fermées en profondeur (lesquels flux pourraient être piégés pendant une longue durée) n'est pas à écarter.

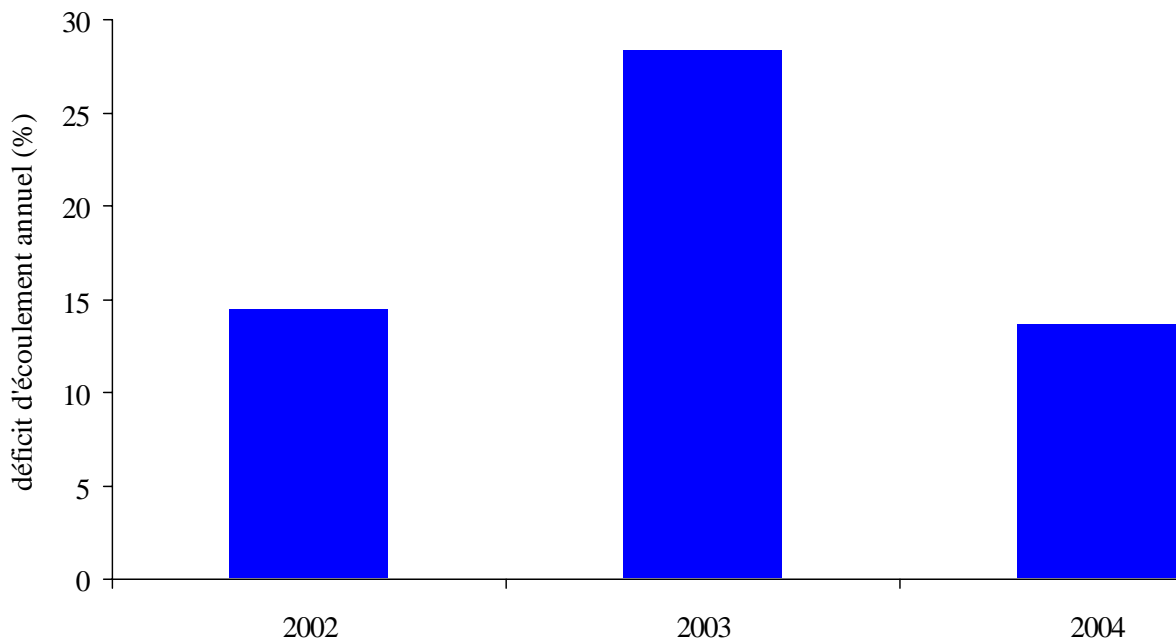


Figure 53 : Déficit d'écoulement en 2002, 2003 et 2004 sur le bassin de la Donga.

IV- FONCTIONNEMENT HYDROGÉOCHIMIQUE

IV.1- Objectifs

Les observations hydrodynamiques ont permis de mettre en évidence une très faible connexion entre les réservoirs souterrains profonds et le réseau hydrographique. Les écoulements de surface sont majoritairement entretenus par le ruissellement rapide et les flux hypodermiques de subsurface durant la saison humide. Les approches hydrochimique et isotopique viendront donc en appui à ces observations en essayant (i) d'une part d'améliorer la connaissance de l'origine des composantes de l'écoulement et les processus physico-chimiques qui les régissent à partir de traceurs naturels et (ii) d'autre part d'identifier et quantifier les espèces chimiques caractéristiques de chaque compartiment nécessaires à la déconvolution des hydrogrammes (chapitre V suivant) dans le but de quantifier la contribution de chaque composante de l'écoulement. Ce chapitre s'articule autour de deux grandes parties :

- Hydrochimie : après la présentation rapide des processus de minéralisation naturelle des eaux dans les milieux cristallins, nous décrirons les protocoles de prélèvement dans les différents réservoirs (pluie, eaux souterraines et eaux de surface). On abordera ensuite la caractérisation physico-chimique et la compréhension des processus de minéralisation nécessaires à la détermination des composantes de l'hydrogramme,
- Géochimie isotopique : après un bref aperçu des objectifs, on procédera à la caractérisation isotopique et à l'identification des pôles d'influence sur les eaux de surface.

IV.2- Hydrochimie

La caractérisation hydrochimique des compartiments de l'écoulement est réalisée dans un premier temps à partir de données anciennes contenues dans les archives de forages villageois et dans un second temps et de manière plus approfondie, à partir des données récentes obtenues dans le cadre de ce travail.

IV.2.1- Minéralisation naturelle en milieux cristallins

La minéralisation naturelle des eaux est un ensemble complexe de réactions physico-chimiques (principalement acide-base, échanges ioniques et phénomènes d'oxydo-

réduction) entre les matrices solides (minéraux) et le milieu aqueux. La composition chimique des eaux naturelles, en dehors des pollutions généralement d'origine anthropique, est le résultat combiné de la composition chimique des précipitations qui atteignent le sol et des réactions avec les minéraux présents dans l'encaissant. La désagrégation mécanique est la première étape du processus de minéralisation des eaux (fig. 54). Elle consiste à l'arrachement, au transfert et à la sédimentation des particules de roche par l'eau (Fournier, 1960 ; Rose, 1993 ; Roose *et al.*, 1998 ; Fornis *et al.*, 2005). Ce processus est associé à une faible mise en solution d'éléments dissous contribuant directement à la minéralisation des eaux. L'altération chimique, deuxième phase de la minéralisation, consiste à la fois à la dissolution et à l'attaque chimique des solides et des gaz par l'eau (Sigg *et al.*, 1992). Elle contribue à la production de charges chimiques dissoutes responsables en grande partie de la minéralisation des eaux.

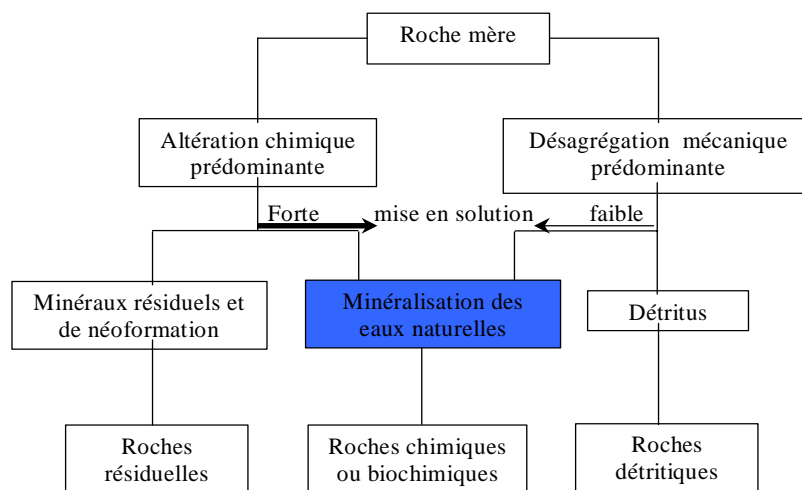
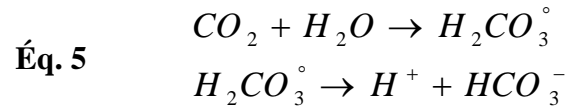


Figure 54 : Mécanismes d'acquisition des charges chimiques dissoutes par l'eau (Aubouin *et al.*, 1968).

Les réactions de mise en solution des charges dissoutes sont d'autant plus intenses que la température et la diffusion sont importantes. Elles sont également plus rapides pour des eaux acides. Cette acidité relève de la dissolution de gaz, notamment le CO_2 qui confère une agressivité à l'eau due aux ions H^+ produits selon l'équation 5 ci-dessous. L'eau ainsi chargée en ions H^+ hydrate d'abord la surface des minéraux essentiellement primaires et hydrolyse ensuite la roche mère. Ces minéraux sont généralement les feldspaths calco-sodiques ou plagioclases (albite : $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ et anorthite : $\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$), les feldspaths potassiques (K-feldspath : KAlSi_3O_8) et les minéraux ferromagnésiens (biotite : $\text{K}[\text{Mg}_2\text{Fe}] [\text{AlSi}_3]\text{O}_{10} (\text{OH})$, pyroxène : $[\text{Ca}_{1,15}\text{MgAl}_3\text{Si}_{1,7}]\text{O}_6$ et les amphiboles).



La mise en solution a lieu en général dans la zone non saturée (Appelo et Postma, 1999) et s'accompagne toujours de la néoformation d'argiles secondaires de séquence d'apparition liée au climat et à l'intensité du lessivage. Dans les milieux tropicaux, chauds et humides comme sur notre site d'étude, cette séquence est composée de phyllosilicates divers selon l'ordre d'apparition suivant : séricite → vermiculite → montmorillonite → illite → kaolinite → gibbsite (Aubouin *et al.*, 1968). La figure 55 illustre de façon schématique la transformation des plagioclases en argiles néoformées dans les roches cristallines. Une recherche constante d'équilibre chimique entre ces minéraux néoformés et la phase liquide s'en suit. Il en résulte que dans les aquifères riches en minéraux secondaires, le contact entre eaux météoritiques agressives et formation encaissante va provoquer une série de réactions d'échange de bases en vue d'un ajustement de l'équilibre liquide-solide. Ceci aboutit à l'ionisation et à l'entraînement des bases fortes telles que Ca, Mg, K, Na, Al et Si en solution. Lorsque l'équilibre est atteint, la composition chimique de l'eau devra se rapprocher de la composition chimique et minéralogique des minéraux secondaires. C'est pourquoi la nature pétrographique des formations traversées peut fournir des indications précieuses sur la chimie de l'eau et réciproquement.

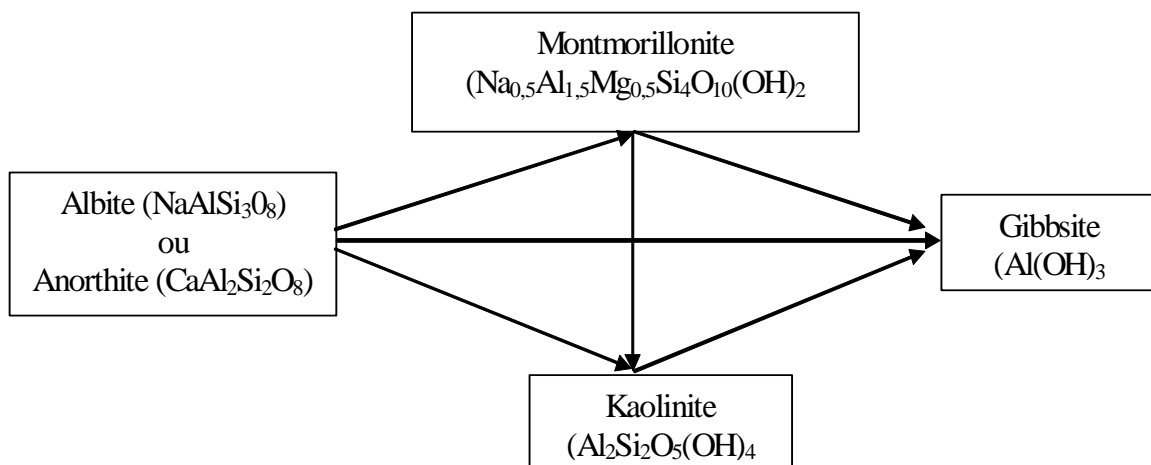


Figure 55 : Schéma du processus de transformation des plagioclases en argiles de néoformation dans les roches cristallines.

IV.2.2- Analyse des données historiques

Les données géochimiques anciennes sur le bassin de la Donga sont rares. Pour les eaux de pluie et de rivières, elles sont inexistantes. Les quelques données disponibles portent essentiellement sur les eaux souterraines. Elles sont issues de rapports de forages dispersés entre les différentes structures du pays intervenant en hydraulique villageoise (Jacquin et Seygona, 2004). Ces données serviront donc à apprécier la signature chimique ancienne des réservoirs de socle uniquement.

IV.2.2.1- Localisation des points de mesure

Les mesures historiques disponibles portent sur des forages villageois à usage domestique. On dispose de 13 mesures physico-chimiques (fig. 56). Les caractéristiques techniques et hydrogéologiques sont mentionnées en annexe 3. L'analyse des données historiques permet une vue rétrospective des caractéristiques physico-chimiques des réservoirs de socle. La mesure des conductivités électriques et la détermination des concentrations ioniques ont été réalisées au laboratoire d'analyse des eaux de la Direction Générale de l'Hydraulique de Cotonou par titrimétrie, colorimétrie et spectrométrie d'absorption moléculaire.

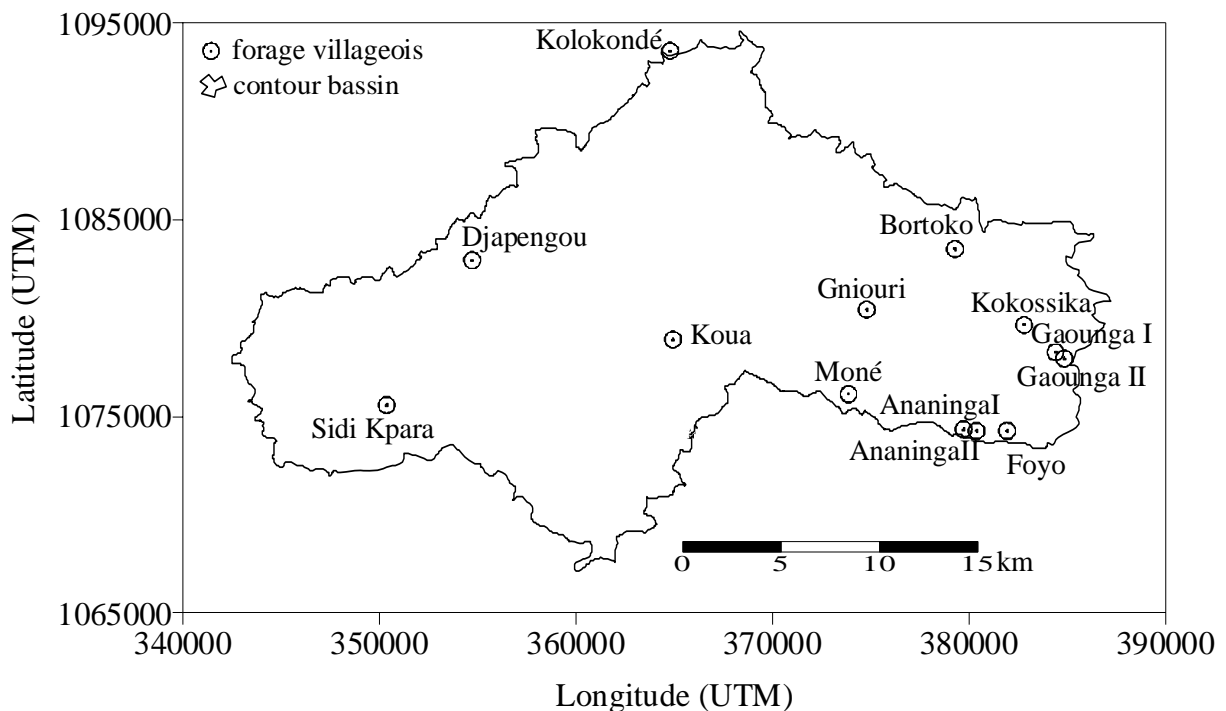


Figure 56 : Forages d'hydraulique villageoise présentant des données chimiques historiques (période de foration : 1984-2002).

IV.2.2.2- Conductivité électrique

Les données de conductivité électrique (C.E.) anciennes répertoriées sont indiquées en annexe 18.

La C.E. varie de 168 à 1079 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 57). Seule la station de Gaounga I enregistre une valeur particulièrement forte (1079 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette station ne sera pas prise en compte dans l'analyse fréquentielle suivante. Les conductivités électriques varient alors de 168 à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci traduit majoritairement une faible minéralisation des eaux. Parmi les 12 valeurs, une seule se situe dans l'intervalle 100 et 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 4 dans l'intervalle 200 et 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La majorité des valeurs sont comprises dans la gamme 300-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La médiane de 305 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se situe dans cet intervalle qui renfermerait probablement la valeur de conductivité représentative des eaux.

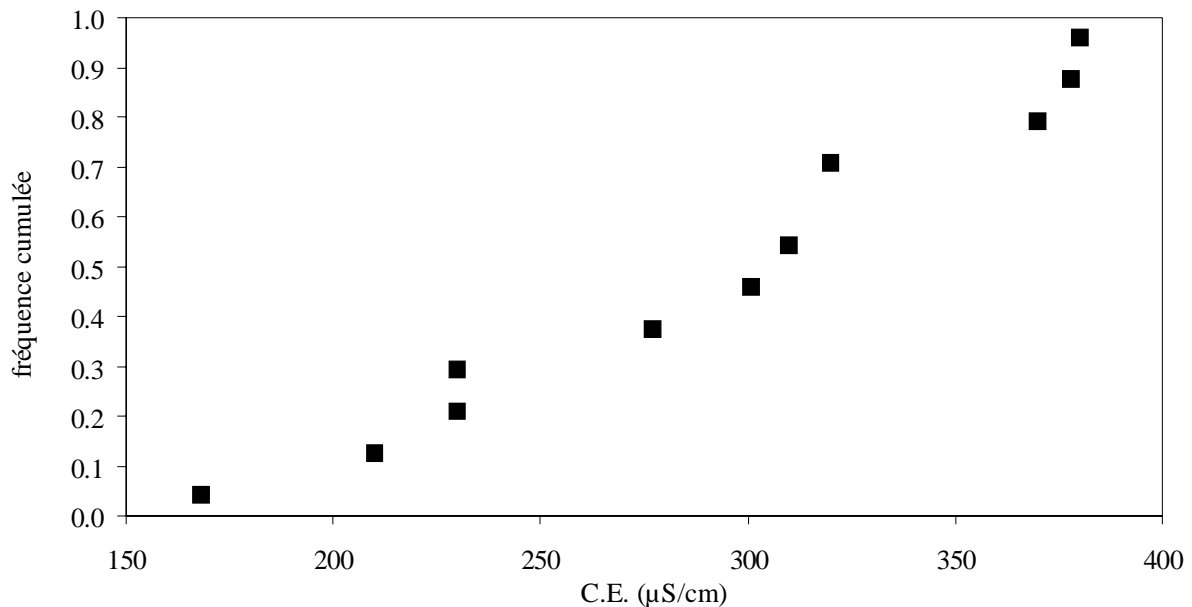


Figure 57 : Fréquence au non dépassement des C.E. mesurées lors de la réalisation des forages d'hydraulique villageoise sur le bassin de la Donga.

La C.E. semble totalement indépendante de la profondeur moyenne des crépines (fig. 58) en désaccord avec l'idée d'une augmentation avec la profondeur. Ceci témoignerait à la fois de l'absence d'une stratification nette et de l'hétérogénéité des eaux à ces profondeurs.

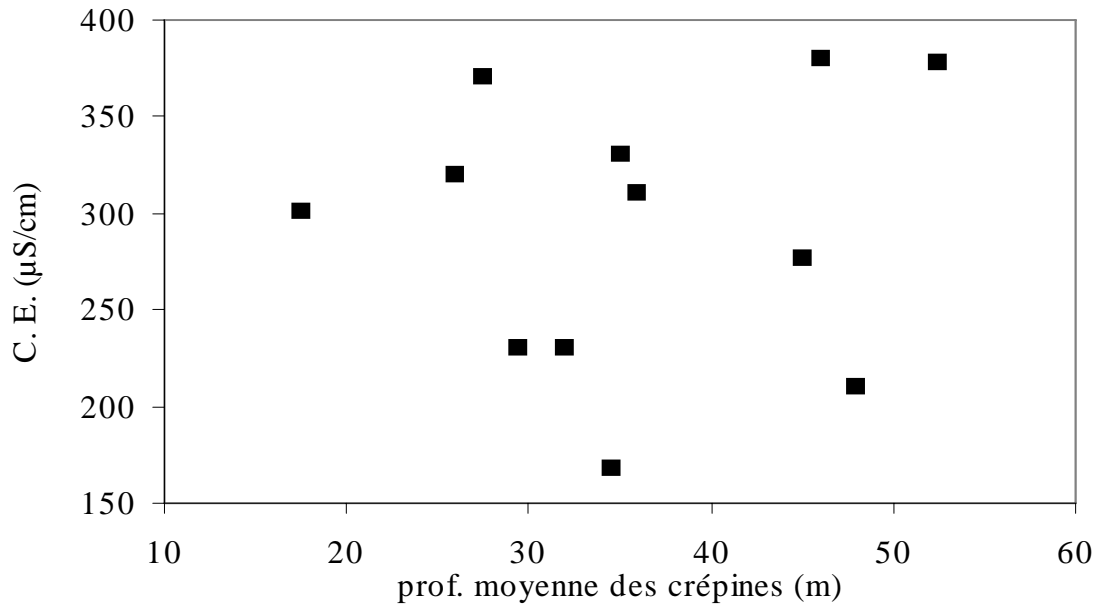


Figure 58 : C.E. en fonction de la profondeur moyenne des crépines.

IV.2.2.3- Signature des ions majeurs

Le calcul des balances ioniques nécessaires à une discussion sur la précision analytique est impossible de par l'absence des concentrations en Na, K et SO₄ (annexe 19). La description des faciès chimiques (les ions majeurs essentiellement) reste donc limitée aux espèces figurant dans les archives.

La contribution des espèces chimiques dissoutes à la minéralisation des eaux peut être appréciée à partir du graphique de la figure 59. Il est réalisé sur la base des moyennes calculées pour chaque élément, par intervalle de conductivité électrique. Dans l'intervalle 100-200 μS/cm, on dispose d'une seule valeur ; Ca (0,70 meq/l) est le cation dominant et HCO₃ (1,75 meq/l) l'anion dominant suivi de Cl (la teneur en NO₃ est nulle). Dans l'intervalle 200-300 μS/cm, HCO₃ domine (3,04 meq/l), suivi de Ca (1,23 meq/l), de Mg (0,74 meq/l), de Cl (0,21 meq/l) et de NO₃ (0,02 meq/l). Pour la gamme 300-400 μS/cm, l'ordre d'importance ionique est identique à celui de la deuxième gamme.

La très forte conductivité électrique enregistrée à Gaounga I est le fait de la teneur en Ca qui est de l'ordre de 4 fois supérieure à celle mesurée aux autres stations et suggérerait une prédominance anionique des sulfates, non déterminés à cette époque. Malgré cette contribution très variable des éléments chimiques majeurs, on peut retenir que le faciès bicarbonaté calco-magnésien domine dans l'ensemble la signature chimique des eaux. Les éléments Cl et NO₃, probablement d'origine anthropique dans notre contexte, sont représentés

en très faible quantité, témoignant d'une absence (logique) de pollution (les forages sont plus profonds et mieux protégés). Par ailleurs, les teneurs en Ca, Mg et HCO₃ semblent augmenter avec la conductivité ; les autres ayant des concentrations plus stables.

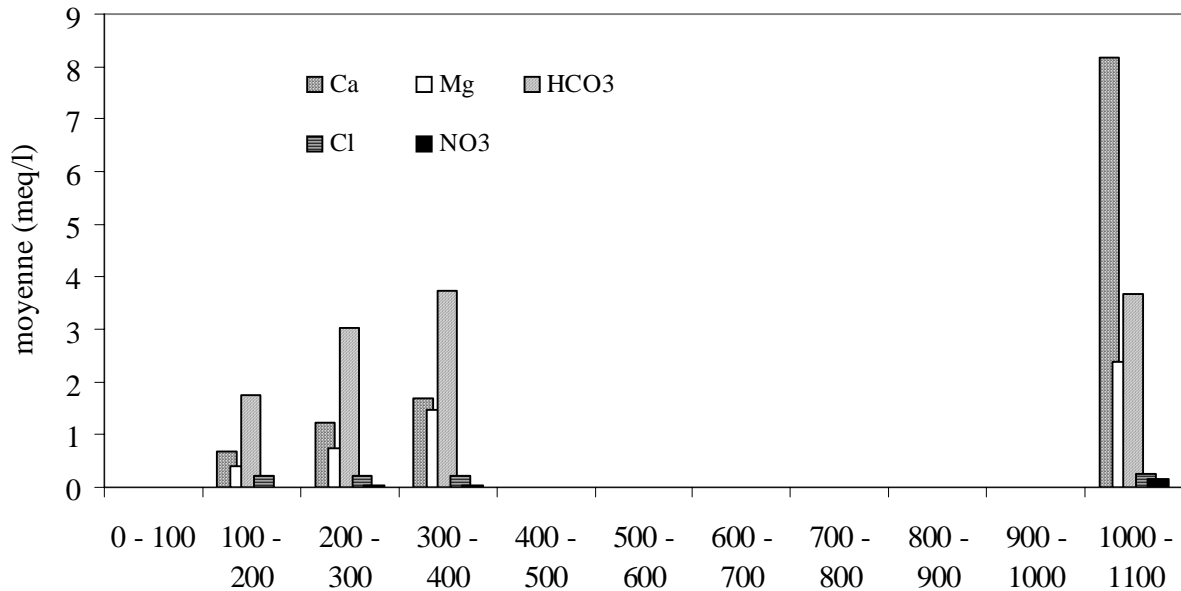


Figure 59 : Contribution moyenne des ions majeurs à la minéralisation des eaux.

IV.2.2.4- Conclusion

Les caractéristiques physico-chimiques des nappes de socle, établies sur la base des données historiques, traduisent une minéralisation relativement faible des eaux (298 ± 70 $\mu\text{S/cm}$) avec une signature chimique dominée par les éléments Ca et HCO₃. Nous procéderons ultérieurement (chapitre IV.2.3.5.2.2) à une analyse comparée entre ces caractéristiques anciennes et celles obtenues dans le cadre de notre étude.

IV.2.3- Analyse des données collectées

Parallèlement aux mesures pluviométriques, piézométriques et hydrométriques, un nombre important de données géochimiques a été obtenu dans le cadre de ce travail.

IV.2.3.1- Dispositif de mesure et échantillonnage

Dispositif de mesure : le réseau de mesure des paramètres physico-chimiques dans les précipitations, les eaux souterraines et les rivières est indiqué dans la figure 60.

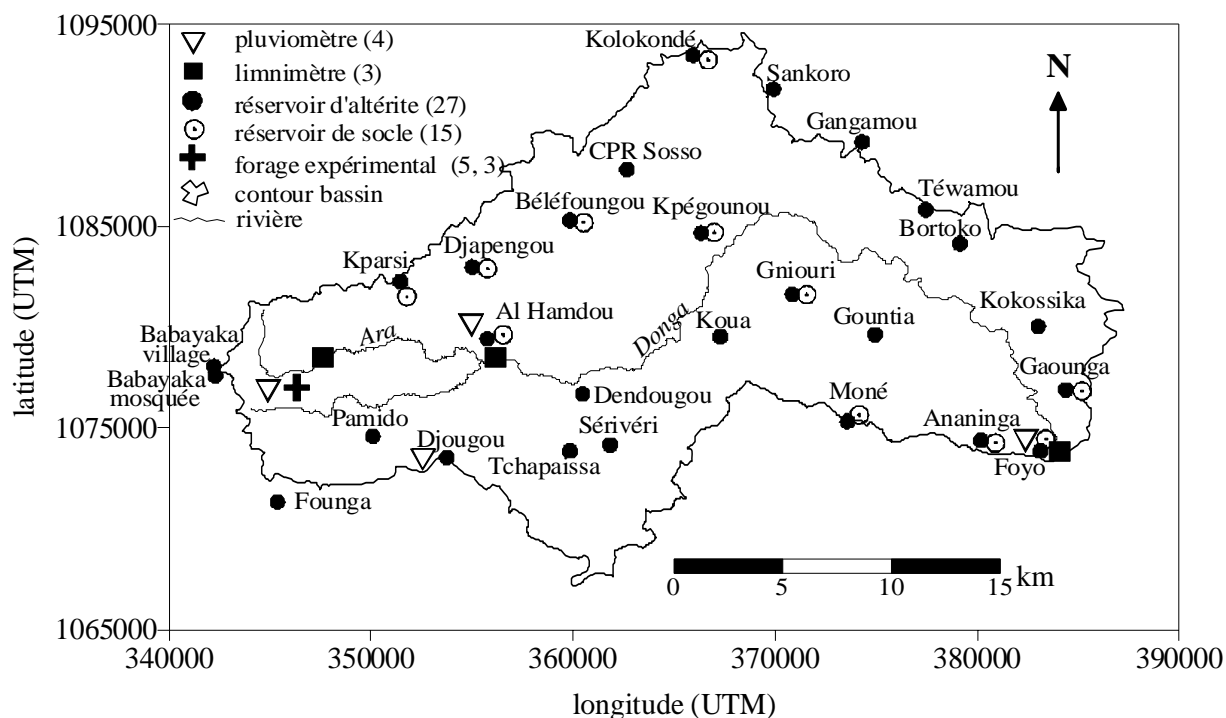


Figure 60 : Réseau de mesure physico-chimiques et isotopiques à l'échelle de la zone d'étude ; le nombre de stations est indiqué entre parenthèse.

On dispose de 4 pluviomètres dont 3 sont situés à proximité d'une station limnimétrique pour commodité d'échantillonnage et le dernier à la station météorologique de Djougou. Ils sont équipés d'une tige de 1,5 m de haut supportant un récipient métallique (400 cm² de section) servant à recueillir l'eau de pluie (fig. 61). Ces pluviomètres, destinés uniquement à l'échantillonnage géochimique, ont été installés pendant la saison des pluies 2003.



Figure 61 : Pluviomètre de Nalohou II (9°44' N, 1°36' E) servant à l'échantillonnage géochimique des précipitations (photo du 25/07/03).

Les stations limnimétriques représentant l'exutoire des sous-bassins emboîtés (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont), font l'objet de mesures hydrométriques (cf. chapitre III) et constituent également les points d'échantillonnage des eaux de surface (débits de base et crues). 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.

Pour les eaux souterraines, trois catégories de points de mesures hydrochimiques ont été considérées :

- la première catégorie est constituée des 27 puits villageois déjà décrits dans le chapitre III (annexe 4). Ces ouvrages permettent d'accéder aux réservoirs d'altérites. Parmi ces puits, seuls quatre (Al Hamdou, Babayaka mosquée, Gountia et Kparisi) n'ont pas fait l'objet d'un suivi piézométrique au moment de l'échantillonnage géochimique permettant de replacer l'échantillonnage dans la dynamique de la nappe,
- la seconde catégorie est constituée de 15 forages permettant l'accès aux réservoirs profonds, sous-jacents aux nappes d'altérites et assimilés aux nappes de socle. Ces forages ont servi uniquement aux mesures hydrochimiques (aucune mesure piézométrique n'est possible, les têtes de forage étant surmontées de pompes à motricité humaine). Leurs caractéristiques techniques et hydrogéologiques sont indiquées en annexe 3,
- la troisième catégorie est formée par les piézomètres expérimentaux déjà décrits dans le chapitre II et III. Ils captent les réservoirs souterrains à 2, 10 et 20 m de profondeur.

Échantillonnage : quatre campagnes de mesures géochimiques ont été réalisées. Le nombre de points de mesure et les objectifs assignés à chaque campagne sont étroitement liés au type de réservoir considéré et à la période d'échantillonnage. La première campagne a été réalisée par G. Favreau en juillet 2002 (saison pluvieuse). Elle avait un but exploratoire. Il s'agissait d'une reconnaissance globale de la chimie des eaux sur la zone d'étude. La seconde collecte a eu lieu en saison sèche (février 2003) pour l'établissement des signatures chimiques des eaux souterraines et pour déceler une éventuelle variabilité saisonnière. Le protocole défini pour la troisième campagne (saison pluvieuse 2003) a pris en compte le prélèvement des eaux souterraines mais a été essentiellement fondé sur le suivi des crues et écoulements de base. La dernière campagne avait pour but de mieux définir les composantes de l'écoulement

en intensifiant l'échantillonnage à la fois des débits de base aux stations limnimétriques considérées et des eaux de subsurface et profondes, notamment à partir des piézomètres expérimentaux.

IV.2.3.2- Méthodes et précisions analytiques

Les méthodes analytiques employées varient selon le type de mesure réalisée. Quatre types de mesure ont été effectués : paramètres physico-chimiques, ions majeurs, éléments traces et isotopes stables de l'eau. Les paramètres physico-chimiques sont toujours mesurés *in situ*, aussi bien de façon ponctuelle que de façon continue. Les mesures ponctuelles (conductivité électrique : C.E., température : T°, pH et oxygène dissous : O₂) sont réalisées au moyen d'un multimètre WTW régulièrement calibré (fig. 62).

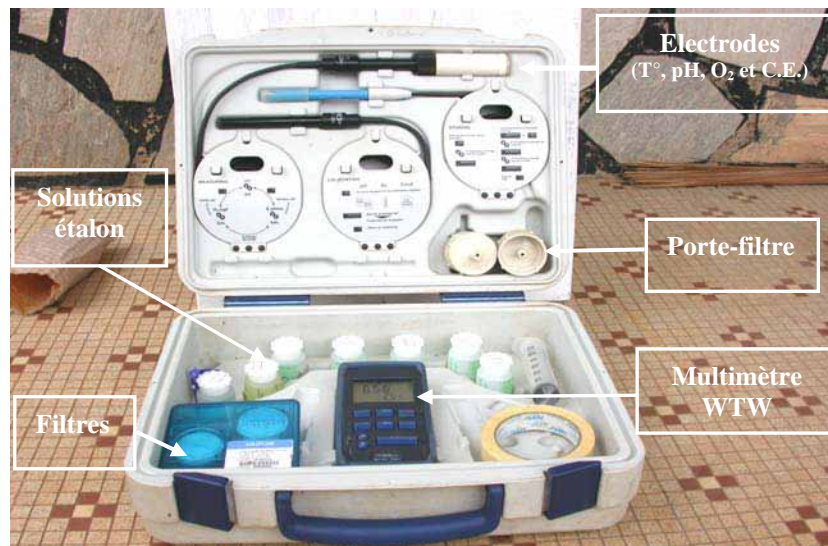


Figure 62 : Mallette de mesure physico-chimique (photo du 30/08/03).

Le suivi en continu a été réalisé matin, midi et soir dans 8 puits et forages villageois au moyen de conductimètres portatifs de type CONMET confiés à des lecteurs villageois. Les rivières ont été suivies en continu au moyen de conductimètres automatiques de marque Greenspan (précision $\pm 0,2\%$), installés à Donga-Kolo et Donga-Pont (mauvais fonctionnement) en 2003 et Ara-Pont et Kolo-Pont en 2004. La résolution temporelle adoptée est de 5 mn à Ara-Pont et Donga-Kolo (bassins de petites tailles) et 30 minutes à Donga-Pont (bassin plus grand). En période de crues, des mesures ponctuelles ont été réalisées au moyen du système WTW pour comparaison.

Plusieurs facteurs déterminent la précision des mesures physico-chimiques. Les erreurs absolues sont d'autant plus fortes que les eaux sont faiblement minéralisées. Les conditions de terrain souvent défavorables (chaleur, manipulation régulière de l'appareil) peuvent également avoir une action négative sur la précision des mesures. Ces facteurs concernent tous les appareils de mesure décrits plus haut. L'incertitude (multimètre WTW) est de $\pm 10 \%$ pour la conductivité. Elle est de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ et $\pm 0,2$ respectivement pour la température et le pH.

Contrairement aux paramètres physico-chimiques, l'analyse chimique pour la détermination des éléments majeurs est effectuée en laboratoire. Tous les échantillons sont filtrés *in situ* dans des flacons en polyéthylène haute densité (HDPE) de type Nalgène à travers un filtre de porosité $0,45 \mu\text{m}$ pour la détermination des éléments majeurs. L'analyse a ensuite été réalisée au laboratoire de chimie des eaux d'HydroSciences Montpellier avec une précision de 5% par électrophorèse capillaire Quanta 4000-Waters® (cations, SO_4 , NO_3 et Cl) ou titration acide (HCO_3) par la méthode de Gran. Plus de 95 % de ces analyses (les eaux souterraines en majorité) ont une balance ionique inférieure à $\pm 5\%$. Les balances ioniques supérieure à $\pm 5 \%$ correspondent à des minéralisations faibles à très faibles (C.E. $< 80 \mu\text{S/cm}$). Il s'agit en majorité des eaux de surface et des pluies. Les teneurs sont parfois en dessous des limites de détection. Certaines analyses (la plupart des eaux de surface et certaines eaux de pluie) ont été par la suite améliorées par spectrométrie de masse à couplage inductif (ICP-AES) au laboratoire de chimie minérale du CIRAD de Montpellier. Mais pour certaines eaux de pluies, notamment celles de la saison pluvieuse 2004, les balances ioniques n'ont pu être améliorées à cause de leur très faible minéralisation (C.E. $< 10 \mu\text{S/cm}$). Nous pensons que pour cette raison, ces analyses ne doivent pas être rejetées comme étant fausses et pourront être prises en compte dans l'exploitation et l'interprétation des données.

Les flacons destinés aux prélèvements pour la détermination des éléments traces ont été préalablement nettoyés selon la procédure habituelle au laboratoire de chimie des eaux d'HydroSciences Montpellier, puis acidifiés à 1 ‰ avec HNO_3 ultrapur. Tous les échantillons et un échantillon de référence (blanc de terrain) sont filtrés *in situ* directement dans ces flacons au moyen d'une seringue et d'un filtre millipore PVD de porosité $0,22\mu\text{m}$. La concentration en éléments traces est ensuite déterminée par spectrométrie de masse à couplage inductif (ICP- MS ; VG PlasmaQuad Turbo 2+) au service commun ICP-MS de l'Université Montpellier II. L'incertitude analytique est généralement inférieure à 10 % mais peut varier d'un élément chimique à l'autre.

IV.2.3.3- Représentativité de l'échantillonnage

La représentativité des prélèvements constitue en général un problème majeur lors des études hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Pour s'affranchir de cette difficulté, les données sont le plus souvent supposées représentatives de la réalité, sans démonstration. A notre connaissance, la seule étude axée sur la représentativité des données géochimiques réalisée en Afrique de l'Ouest concerne le Continental Terminal au Niger en milieu semi-aride (Favreau *et al.*, 2000). Cette étude avait mis en exergue la très forte influence potentielle de l'insuffisance du renouvellement des ouvrages ouverts sur l'atmosphère sur les caractéristiques géochimiques (paramètres physico-chimiques, isotopes de l'environnement et ions majeurs) des eaux des puits à usage villageois. Dans le cas particulier de notre site d'étude, la problématique de la représentativité de l'échantillonnage se pose à plusieurs niveaux. La rareté des données anciennes ne facilite pas la validation des données récentes à travers des comparaisons à long terme. Au manque de données historiques s'ajoutent les conditions même de l'échantillonnage.

Pour les eaux souterraines, à l'échelle de l'ensemble du bassin, si les forages constituent un équipement favorable à la protection des eaux, les puits villageois sont pour la plupart largement ouverts à l'atmosphère et souvent cimentés (fig. 63). Ils sont ainsi exposés à l'action combinée d'un dégazage éventuel, des aérosols divers (pluie) et de la matière organique (plantes aquatiques, branches, insectes, crapauds, tortues ont été identifiés). La composition chimique naturelle peut s'avérer modifiée et l'eau échantillonnée non représentative de celle de l'aquifère.



Figure 63 : Exemple d'un puits villageois largement ouvert et mal entretenu (Pamido, juillet 2003).

La représentativité de l'échantillonnage se pose également au niveau du traitement même des eaux de puits. En effet, les services de l'hydraulique villageoise distribuent régulièrement des produits chimiques à base de javel (donc riches en chlorure et en sodium) destinés à désinfecter l'eau des puits. Ces produits sont directement injectés au fond des ouvrages. La conséquence est la modification de la signature chimique originelle de l'eau jusqu'à disparition totale du produit injecté soit par dilution, soit par prélèvement domestique progressif. Ceci se caractérise par des pics anormaux dans les chroniques de conductivité électriques mesurées tri-quotidiennement. À la station d'Ananinga par exemple (fig. 64), une hausse anormale de l'ordre de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a pu être constatée.

Pour réduire au mieux l'impact de ces différentes perturbations, un puisage intensif a toujours précédé l'échantillonnage. On provoque ainsi un rabattement du niveau de la nappe au point de mesure d'environ 2 à 4 m.

Pour le cas spécifique du site expérimental, la problématique de la représentativité de l'échantillonnage est a priori résolue. Les piézomètres de ce site sont exclus de tout usage domestique et ont un rôle exclusivement expérimental. Mais pour des raisons d'équilibre chimique entre les réservoirs captés et l'atmosphère, l'échantillonnage a lieu généralement 5 à 10 mn après une vidange des ouvrages à l'aide d'un tube cylindrique. Cette vidange entraîne souvent une baisse du niveau de l'eau de plus de 5 m.

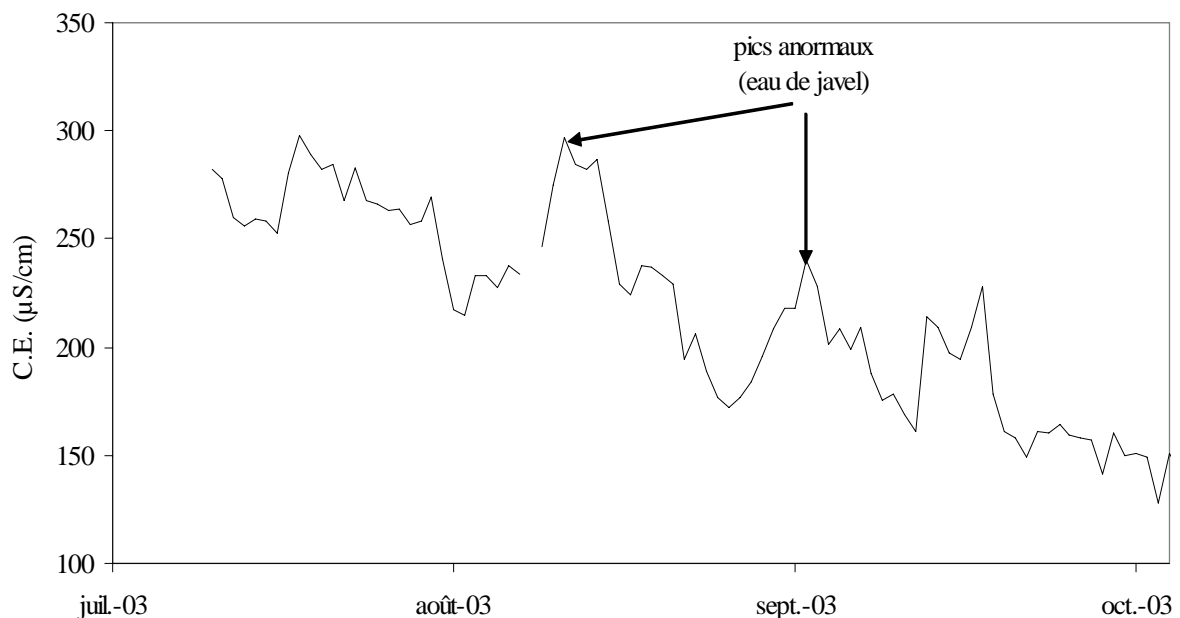


Figure 64 : Pics anormaux de la C.E., conséquence du traitement des puits, à base de javel (NaOCl), par les services de l'hydraulique villageoise (exemple du puits d'Ananinga).

Pour les eaux de surface, en période humide, la représentativité des données est a priori bonne, vu l'importance des débits. Les contaminations anthropiques (lessives et lessivage d'engrais des surfaces cultivées) sont très largement diluées.

Pour les eaux de pluies, l'échantillonnage répondant aux conditions strictes de représentativité nécessite des prélèvements pendant l'évènement pluvieux. Ce protocole a été difficile à mettre en œuvre (faible nombre d'opérateurs). Mais les eaux de pluies échantillonnées sont pour la plupart prélevées 5 à 20 mn après la pluie. Ceci a le mérite de réduire le risque d'une contamination atmosphérique et d'une évaporation susceptible de modifier la signature originelle des eaux. De plus, les pluviomètres métalliques utilisés sont une source potentielle de contamination pour les éléments traces, notamment les métaux dont certains seront systématiquement exclus de l'analyse des données.

IV.2.3.4- Caractérisation des précipitations

L'étude des caractéristiques hydrochimiques des précipitations est indispensable à l'identification de la signature du signal d'entrée dans les nappes et à la compréhension de la minéralisation des eaux souterraines (Wagner et Stelle, 1985 ; Appelo et Postma, 1999).

À l'échelle de l'Afrique intertropicale, plusieurs études se sont intéressées à la chimie des précipitations (Freydier *et al.*, 1998 ; Galy-Lacaux et Modi, 1998 ; Freydier *et al.*, 2002 ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 2003). Celles-ci ont mis l'accent sur l'origine de la minéralisation des précipitations à partir des compositions chimiques observées. Nous les utiliserons donc à titre comparatif (rapports ioniques notamment) dans notre analyse. L'ensemble des pluies échantillonnées avec les hauteurs précipitées est indiqué en annexe 20.

- **T°, pH, O₂ et C.E.**

Les températures (T°) mesurées dans les pluviomètres ne semblent pas être représentatives des précipitations du fait de l'équilibre possible entre la température réelle des pluies et celle du récipient. Elles sont donc enregistrées à titre indicatif. Mais ces valeurs se rapprochent bien de celles de l'air (en moyenne 27°C) mesurées à la station météorologique de Djougou (fig. 65).

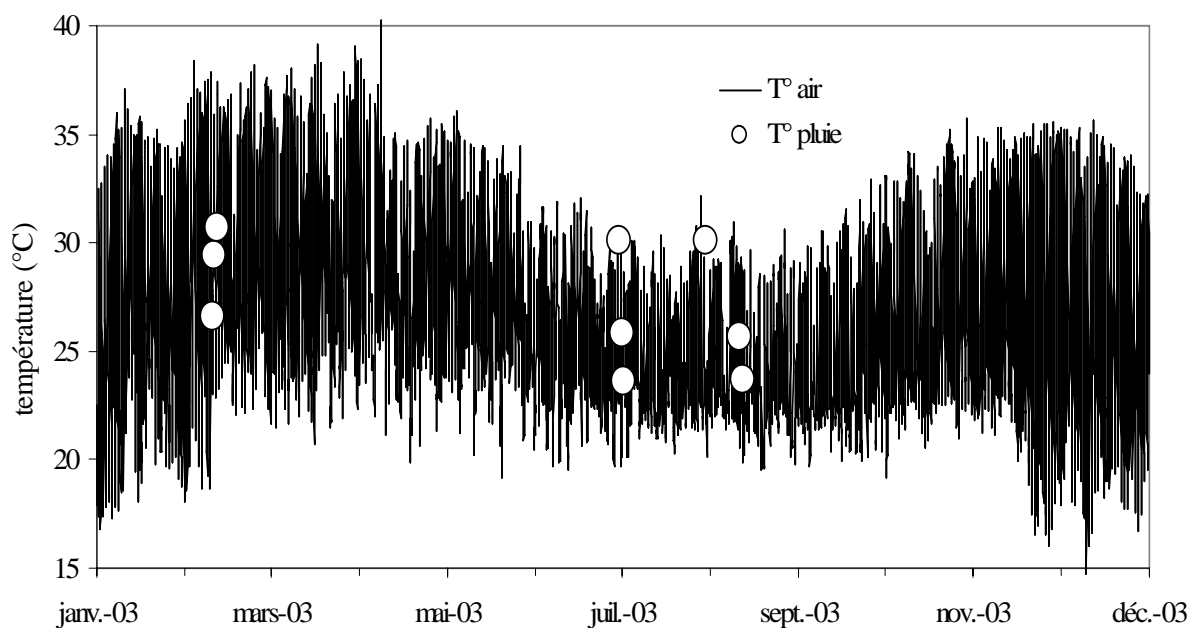


Figure 65 : Températures des précipitations et de l'air mesurées à la station météorologique de Djougou en 2003.

Le pH varie de 5,0 à 5,6, avec une moyenne de 5,3 en saison sèche et proche de la neutralité ($\text{pH} \approx 7$) en saison humide (tableau 8). En saison sèche, les pluviomètres sont régulièrement sous l'influence des poussières transportées par l'harmattan et des aérosols produits lors des feux de forêt très fréquents pendant cette période. Durant la saison pluvieuse, l'atmosphère (tout comme les pluviomètres) subit un lessivage régulier traduisant une baisse de l'acidité.

Les teneurs en oxygène dissous (O_2) des échantillons sont dans une gamme de 70 à 90 % (tableau 8) et indiquent probablement une faible activité microbienne dans les eaux récoltées quelque temps après l'évènement pluvieux.

Les valeurs de la C.E. sont indiquées dans le tableau 8. Elles sont plus fortes en saison sèche ($121 \mu\text{S}/\text{cm}$). Cette observation est en accord avec les résultats obtenus pour le pH et O_2 de la même saison. En saison humide, la moyenne est d'environ $10,5 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les raisons évoquées plus haut (notamment l'impact de l'harmattan en saison sèche) expliquent aisément la hausse de la minéralisation des eaux de saison sèche.

Périodes	T (°C)	pH	O ₂ dissous (%)	C.E. (µS/cm)
saison sèche (n=3)	28,9 ± 2,1	5,3 ± 0,3	69,5 ± 5,0	121 ± 73
saison humide 2003 (n=8)	26,8 ± 3,4	7,1 ± 0,2	83,4 ± 0,6	11 ± 2
saison humide 2004 (n=6)	27,5 ± 1,1	7,2 ± 0,2	87,2 ± 3,7	10 ± 2

Tableau 8 : T°, pH, O₂ et C.E. moyens dans les précipitations (saisons sèche et humide).

▪ **Signature des ions majeurs**

Sur un diagramme de Piper, deux grands groupes de faciès chimique se dégagent (fig. 66) : chloruré calco-magnésien et bicarbonaté calco-magnésien. Ils diffèrent donc l'un de l'autre par leurs proportions en anions, notamment en Cl (NO₃) et HCO₃. Toutes les eaux de saison sèche sont chlorurées calco-magnésiennes. La plupart des eaux de la saison humide 2003 le sont également ; seules deux sont chlorurées sodiques et une bicarbonatée calco-magnésienne. Les eaux de la saison humide 2004 sont majoritairement bicarbonatées calco-magnésiennes mais deux échantillons sont bicarbonatés sodi-potassiques. Cette grande variabilité saisonnière et interannuelle rend très complexe la détermination de la signature des eaux de recharge.

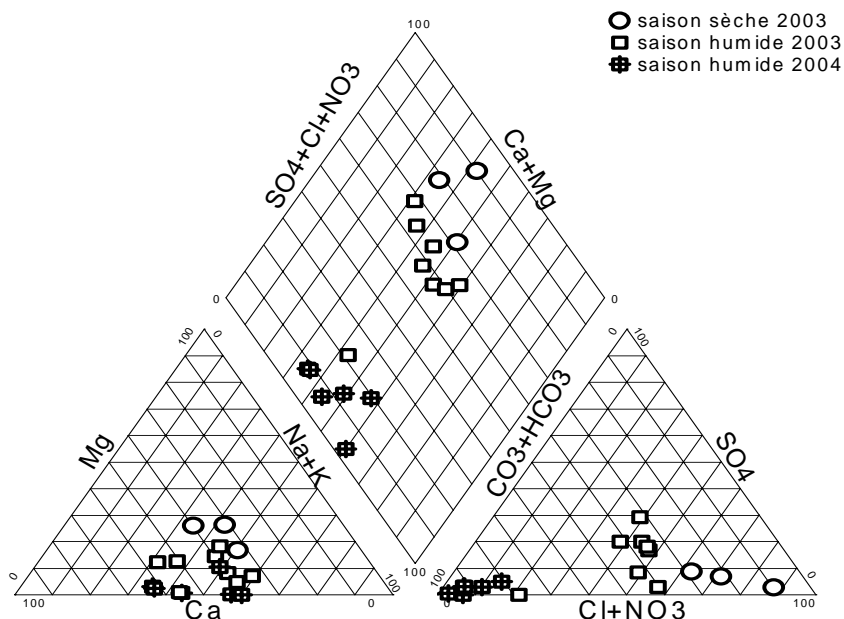


Figure 66 : Diagramme de Piper des précipitations en saisons sèche et humide.

Les compositions moyennes calculées pour la saison sèche 2003 et les deux saisons humides (2003 et 2004) sont indiquées en annexe 21 et 22.

Le silicium a été seulement analysé dans les eaux de saison humide 2003. Avec une moyenne de 0,25 mg/l, cet élément est l'espèce chimique dominante pour cette campagne.

Les précipitations de la saison humide 2004 ont la particularité de contenir du NH_4^+ (0,18 meq/l en moyenne). Cette espèce a déjà été mise en évidence dans les précipitations au Cameroun (Freydier *et al.*, 2002 ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 2003), au Niger (Galy-Lacaux et Modi, 1998 ; Freydier *et al.*, 2002) et en Côte d'Ivoire (Freydier *et al.*, 2002).

Les teneurs moyennes pour les autres éléments sont très variables d'une espèce à l'autre ainsi que d'une saison à l'autre, en accord avec la diversité des faciès chimiques mis en évidence précédemment. Mais dans l'ensemble, les eaux sont plus minéralisées en saison sèche. En saison humide, l'ordre d'importance des éléments est le suivant : $\text{Mg} < \text{K} < \text{Na} < \text{Ca}$ pour les cations et $\text{SO}_4 < \text{NO}_3 < \text{Cl} < \text{HCO}_3$ pour les anions.

De façon générale en Afrique de l'ouest, les éléments chimiques dissous dans les précipitations ont trois sources principales (Taupin *et al.*, 1997 ; Freydier *et al.*, 1998) : terrigène, océanique et biogénique. Dans notre zone, la poussière semble la source majeure d'émission d'éléments grossiers dont l'ensemble définit la source terrigène exprimée par Ca, Mg et SO_4 . La mousson atlantique représente la source océanique définie par les éléments Na et Cl, la source biogénique est le fait des feux de brousse marqués par NO_3 , NH_4 et K. Pour mieux préciser la signature des précipitations, les compositions moyennes ont été comparées aux moyennes obtenues à d'autres stations d'Afrique intertropicale. Ces stations sont Kollo au Niger (2°21' E et 13° N), Lamto en Côte d'Ivoire (5°01' O et 6°13' N) et Nsimi (11°58' E et 3°10' N) au Cameroun. Les eaux de saison sèche (2003) et de saison humide 2004 se détachent des autres précipitations contrairement à celles de saison humide 2003 (fig. 67).

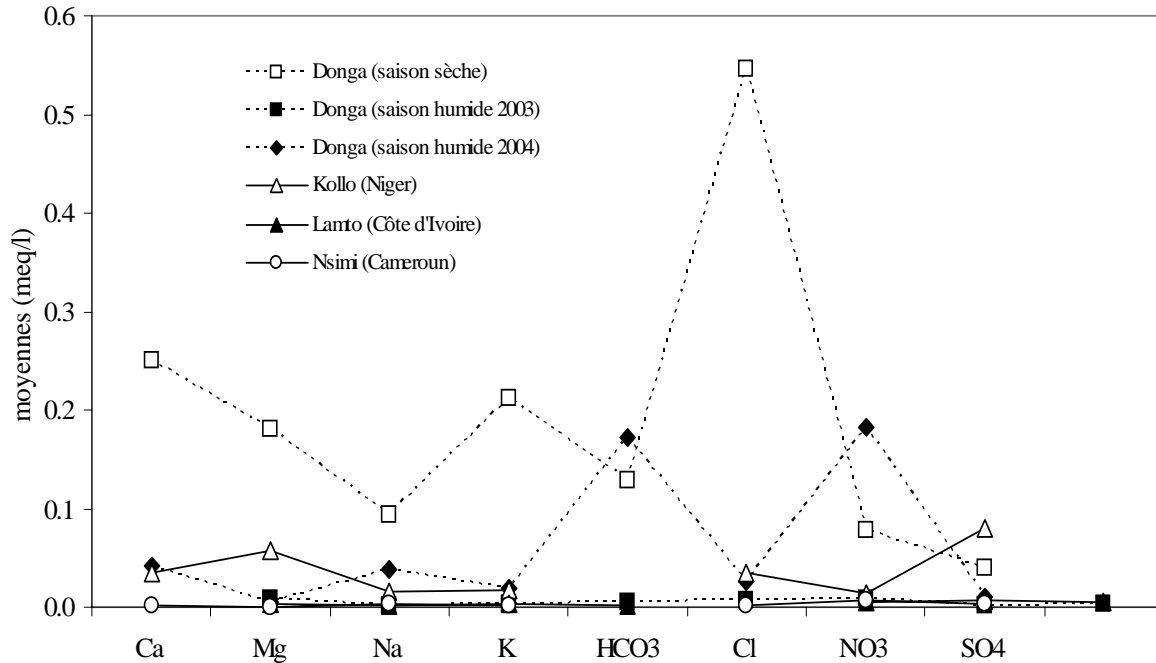


Figure 67 : Compositions moyennes en ions majeurs des pluies de saisons humide et sèche de la zone d'étude avec 3 pluies d'Afrique de l'Ouest (Freydier *et al.*, 1998 ; Freydier *et al.*, 2002).

- **Signature des éléments traces**

Au total, 5 pluies ont été analysées pour la détermination des éléments traces. Le collecteur d'eau étant ouvert à l'atmosphère et de nature métallique (contamination probable), seuls les éléments non métalliques et les éléments Al, Mn et Pb feront l'objet de discussion.

Les moyennes de saison sèche et saisons humides de la zone sont comparées aux moyennes obtenues aux autres stations d'Afrique de l'Ouest. En saison humide, les teneurs moyennes sont largement plus faibles (baisse de près de 100%) avec des pics positifs notamment pour Ba et B contrairement à la saison sèche (fig. 68). L'ordre d'importance est nettement modifié. Les valeurs de saison humide de notre zone sont comparables à celles des stations d'Afrique de l'Ouest, tout comme pour les ions majeurs, confirmant que les prélèvements de saison humide sont plus représentatifs des précipitations de la zone.

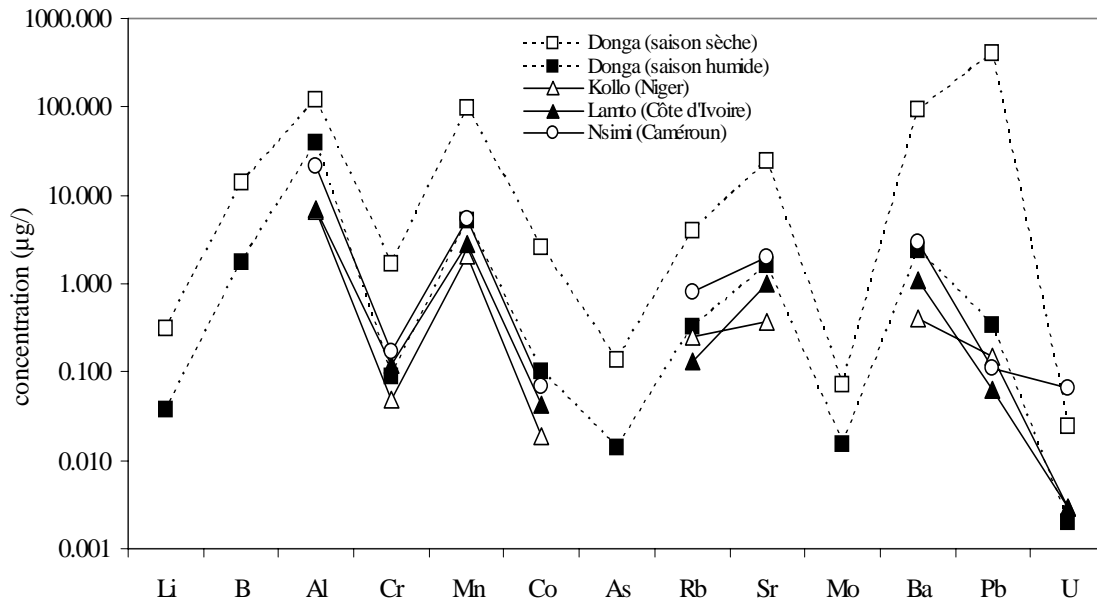


Figure 68 : Compositions moyennes en éléments traces des pluies de la zone avec 3 pluies d’Afrique de l’ouest (Kollo au Niger, Lamto en Côte d’Ivoire et Nsini au Cameroun ; Freydier *et al.*, 2002).

▪ **Conclusion**

Les précipitations sont très peu minéralisées ($10,5 \pm 2 \mu\text{S}/\text{cm}$) et présentent dans l’ensemble deux faciès chimiques dominants :

- chloruré calco-magnésien (saisons sèche et humide 2003)
- bicarbonaté calco-magnésien (saison humide 2004)

Qualitativement, silicium, calcium, magnésium et bicarbonate sont les éléments chimiques majeurs dominants. Pour les éléments traces, le strontium et le baryum dominent.

IV.2.3.5- Caractérisation des réservoirs souterrains

La caractérisation physico-chimique des eaux souterraines est abordée dans un premier temps à l’échelle globale du bassin et dans un second temps à l’échelle plus réduite du versant expérimental.

▪ **Échelle du bassin**

À l’échelle du bassin, la caractérisation porte d’une part sur les eaux des réservoirs d’altérite et d’autre part sur celles des réservoirs de socle sous-jacents.

- **T°, pH et O₂**

Les valeurs moyennes mensuelles de la température dans les réservoirs d'altérite (tableau 9) varient très peu et se rapprochent fortement de 28°C (sauf en juillet 2003). Cette valeur est très voisine de celle de l'air tout comme de celle des précipitations. Ceci témoigne à la fois d'une faible variabilité temporelle et de l'influence probable de la température atmosphérique sur les eaux des réservoirs d'altérite. Pour les réservoirs de socle, les températures moyennes varient également très peu. La moyenne est d'environ 29°C toutes saisons confondues. Les eaux de socle paraissent donc de température légèrement plus importante, probablement du fait du gradient géothermique. Mais cette observation doit être relativisée du fait de la très faible différence de température (1°C) qui entre dans la gamme des incertitudes.

		juil-02	févr-03	juil-03	Août-03	sept-03	oct-03	juil-04	Oct-04
Réservoirs		(17;0)	(28;15)	(22;8)	(19;8)	(23;10)	(11;10)	(8;3)	(26;10)
Altérite	m	28,1	28,0	28,2	28,3	28,0	28,3	26,9	28,0
	σ	0,6	1,3	0,6	0,8	0,7	0,7	2,0	0,7
Socle	m		29,4	29,1	29,7	28,7	28,9	29,2	29,1
	σ		1,5	0,3	0,7	0,9	0,5	0,0	0,7

Tableau 9 : Températures moyennes (m) et écart-types (σ) dans les réservoirs d'altérite et de socle ; le nombre de stations est indiqué entre parenthèses (altérite, socle).

Les valeurs moyennes de pH mesurées pour les réservoirs d'altérite et de socle sont consignées dans le tableau 10. Toutes saisons confondues, elles restent globalement inférieures à 7,0. Elles sont donc plus acides que les eaux de pluie (moyenne = 7,0) du fait de l'influence du réservoir « sol » lors de l'infiltration à travers la zone non saturée (dissolution du CO₂ biogénique). Aucune variabilité temporelle notable ne se dégage, sauf en octobre 2003 pour le socle. Les valeurs restent très comparables et sont très proches d'un mois sur l'autre.

		juil-02	févr-03	juil-03	août-03	sept-03	Oct-03	juil-04
Réservoirs		(17;0)	(28;15)	(22;8)	(19;8)	(23;10)	(11;10)	(8;3)
Altérites	m	6,6	6,6	6,4	6,5	6,4	6,9	6,8
	σ	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
Socle	m		6,6	6,5	6,5	6,7	7,2	6,9
	σ		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2

Tableau 10 : pH moyens (m) et écart-types (σ) mesurés dans les eaux des réservoirs d'altérite et de socle ; (nombre de stations indiqué entre parenthèses (altérite, socle)).

Contrairement aux deux précédents paramètres, le taux en oxygène dissous varie nettement d'une saison à l'autre. Les plus fortes valeurs sont enregistrées en juillet 2002 et février 2003 (saison sèche) et les plus faibles au cœur de la saison humide 2003 où une décroissance des concentrations se dégage pour les réservoirs d'altérite (tableau 11). Cette évolution apparaît paradoxale étant donné que les plus fortes concentrations en oxygène dissous dans les précipitations sont enregistrées durant la saison humide. Ceci peut trouver son explication dans la récurrence du problème de calibration de l'oxymètre lors de la saison humide 2003 et de l'influence probable entre eaux d'altérite et atmosphère. En revanche, les teneurs semblent relativement plus stables pour les réservoirs de socle. Ceci nous paraît logique au regard de leur isolement des perturbations exogènes auxquelles les réservoirs d'altérite seraient exposés.

		juil-02	févr-03	juil-03	août-03	sept-03	oct-03
Réservoirs		(17;0)	(28;15)	(22;8)	(19;8)	(23;10)	(11;10)
Altérites	m	67	56	53	42	34	41
	σ	13	13	11	11	9	7
Socle	m		31	25	23	34	34
	σ		12	5	10	5	6

Tableau 11 : Concentrations moyennes (m) en oxygène dissous (%) et écart-types (σ) mesurées dans les réservoirs d'altérite et de socle ; le nombre de stations est indiqué entre parenthèse (altérite;socle).

- Conductivité électrique

Réservoir d'altérite : contrairement aux trois précédents paramètres, sensibles aux perturbations liées à l'exhaure et/ou aux phénomènes d'oxydo-réduction pour les ouvrages largement ouverts à l'atmosphère, une analyse plus fine se révèle possible. Pour mieux approcher les valeurs représentatives de la C.E. dans les réservoirs d'altérite, des fréquences au non dépassement en fonction des conductivités ont été calculées comme pour les données historiques. Cette démarche porte sur les mesures aux 17 stations suivies régulièrement (annexe 23) ; les autres stations (au nombre de 10) n'ont pas été relevées à une fréquence suffisante. En juillet 2002, 9 mesures seulement ont été effectuées. Nous en tiendrons compte au cours de l'analyse.

Sur l'ensemble des 17 stations communes aux 5 périodes d'observation, une variabilité saisonnière plus ou moins importante de la C.E. apparaît. Mais cette variabilité apparaît peu marquée pour 8 stations dont la C.E. < 300 μ S/cm (annexe 23 ; fig. 69), soit environ 50 % des points. Ces stations seront désormais appelées stations du « groupe A ». Il

en est de même pour les 2 stations à très fortes conductivités ; C.E. > 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soit environ 10 %. Ce sont les stations du « groupe C ». En revanche, les plus fortes variations saisonnières de la conductivité sont enregistrées pour les 7 autres stations de conductivités intermédiaires ; $300 < \text{C.E.} < 900 \mu\text{S}/\text{cm}$, soit 40 % des points. Ce sont les stations du « groupe B ».

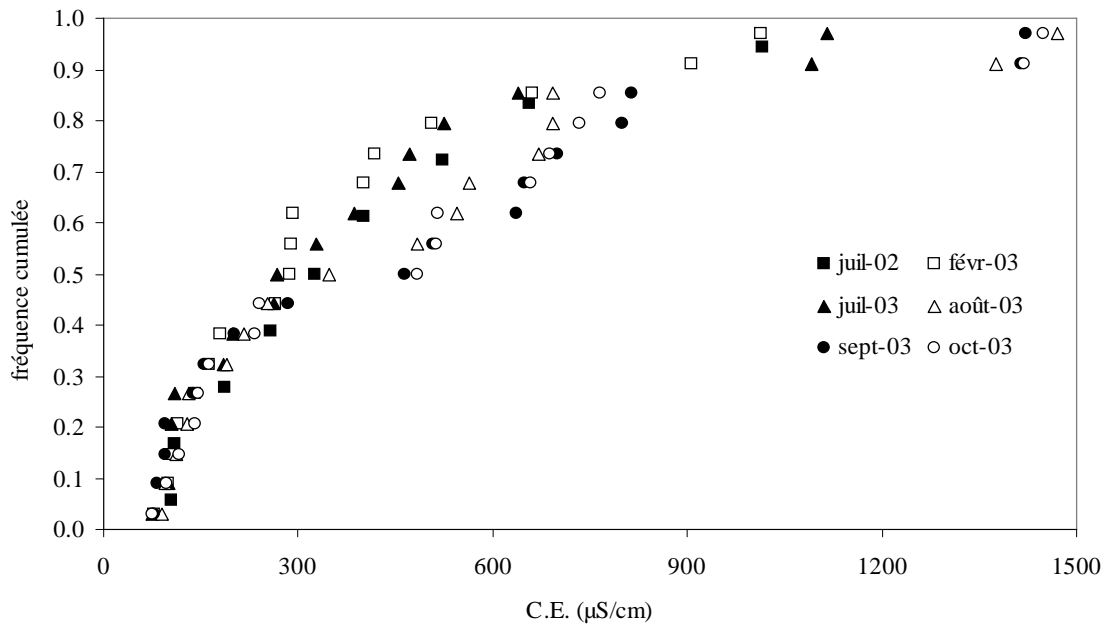


Figure 69 : Fréquence au non dépassement des C.E. des réservoirs d'altérite pour les 17 puits mesurés régulièrement.

Pour mieux caractériser les variabilités saisonnières de la C.E., les moyennes mensuelles, sur la base des 8 puits du groupe A et des 7 puits du groupe B ont été calculées. Vu la très forte valeur de C.E. des 2 puits du groupe C, ce groupe n'est pas pris en compte dans cette analyse. Nous pensons que ces deux puits ne peuvent pas être représentatifs du bassin.

Le groupe A se caractérise par une baisse de la minéralisation moyenne au fur et mesure que la saison pluvieuse s'installe (fig. 70A). Le maximum saisonnier pour ce groupe est enregistré en saison sèche (février 2003 ; $165 \pm 75 \mu\text{S}/\text{cm}$) et le minimum au cœur de la saison humide au pic piézométrique (septembre 2003 ; $140 \pm 70 \mu\text{S}/\text{cm}$, fig. 70B), soit une variation d'environ $25 \mu\text{S}/\text{cm}$. En revanche, on observe une évolution saisonnière contraire pour le groupe B, caractérisée par une hausse en saison humide. Le maximum est enregistré en septembre 2003 ($650 \pm 135 \mu\text{S}/\text{cm}$) et le minimum en février 2003 ($380 \pm 180 \mu\text{S}/\text{cm}$) soit

une variation de 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci indique un fonctionnement hydrochimique nettement distinct entre ces deux groupes de puits.

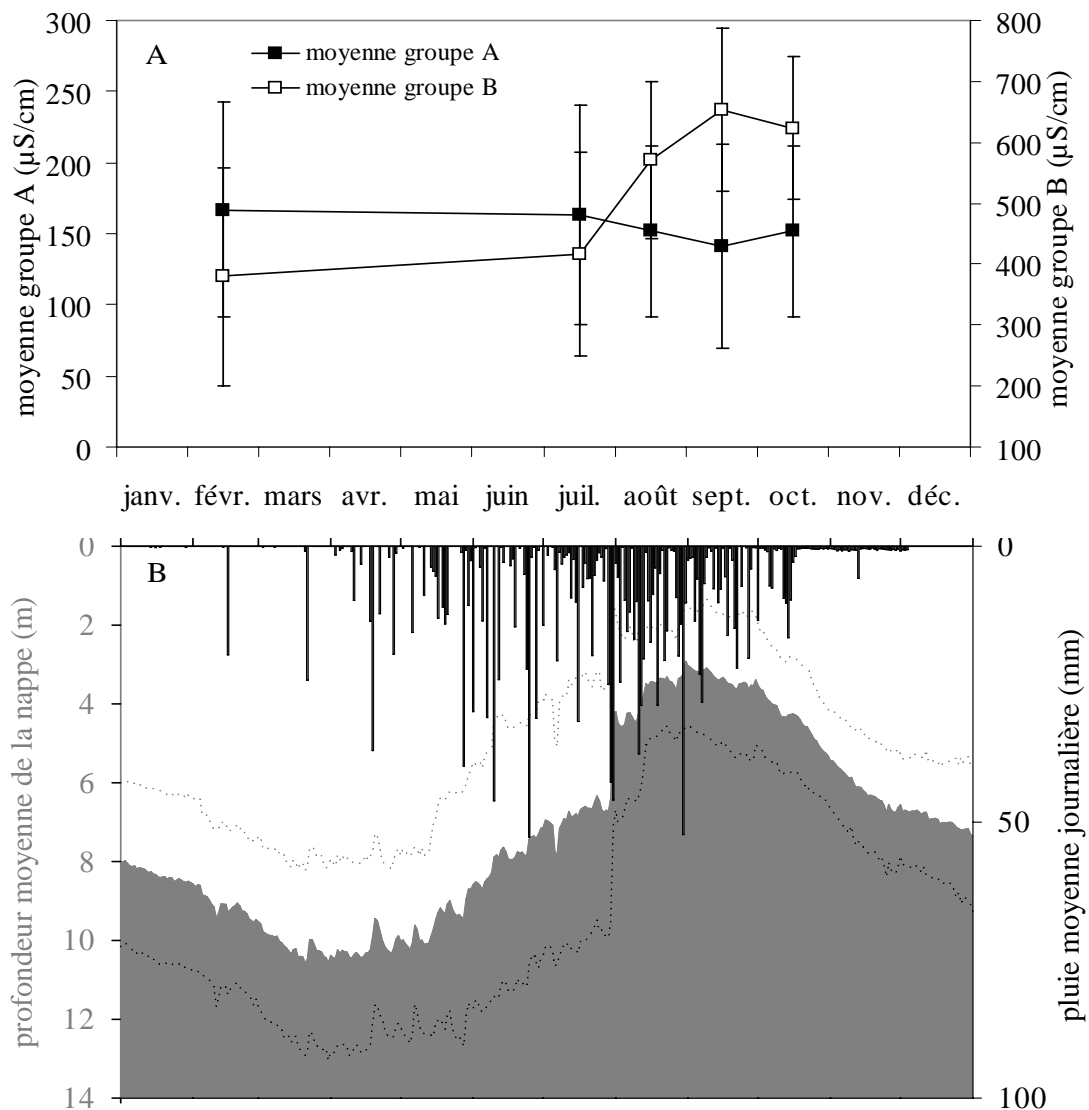


Figure 70 : (A) Variabilité saisonnière de la C.E. pour les groupes A (n = 8) et B (n = 7) en parallèle à (B) la pluviométrie et à la dynamique de la nappe libre à l'échelle de l'ensemble du bassin en 2003.

Un suivi en continu (3 fois /jour) a été réalisé sur 6 puits afin de mieux caractériser la C.E.. La plupart de ces puits appartiennent aux groupes B et C. Seul le puits d'Ananina est du groupe A. En accord avec les observations faites précédemment sur les variations saisonnières de la C.E., la recharge de la nappe à Ananina correspond à une chute des valeurs de conductivité tandis que la vidange correspond à une hausse de la minéralisation (fig. 71). Cette station illustre donc le comportement des puits du groupe A pour lequel la saison pluvieuse provoque une dilution systématique des eaux. Au contraire, on observe une

évolution concomitante de la conductivité et de l'épaisseur de la nappe pour les puits des groupes B et C. La recharge du réservoir marque un accroissement de la minéralisation des eaux qui culmine avec le pic piézométrique. Ce fait indique que la mise en charge de l'aquifère est un processus favorable à la mise en solution des ions. La vidange s'effectue simultanément au retour de la conductivité vers des valeurs de début de recharge. Cette mise en solution pourrait être caractéristique de pollution anthropique. L'analyse des ions majeurs qui sera effectuée au chapitre IV.2.3.5.1.3, permettra de résoudre cette incertitude.

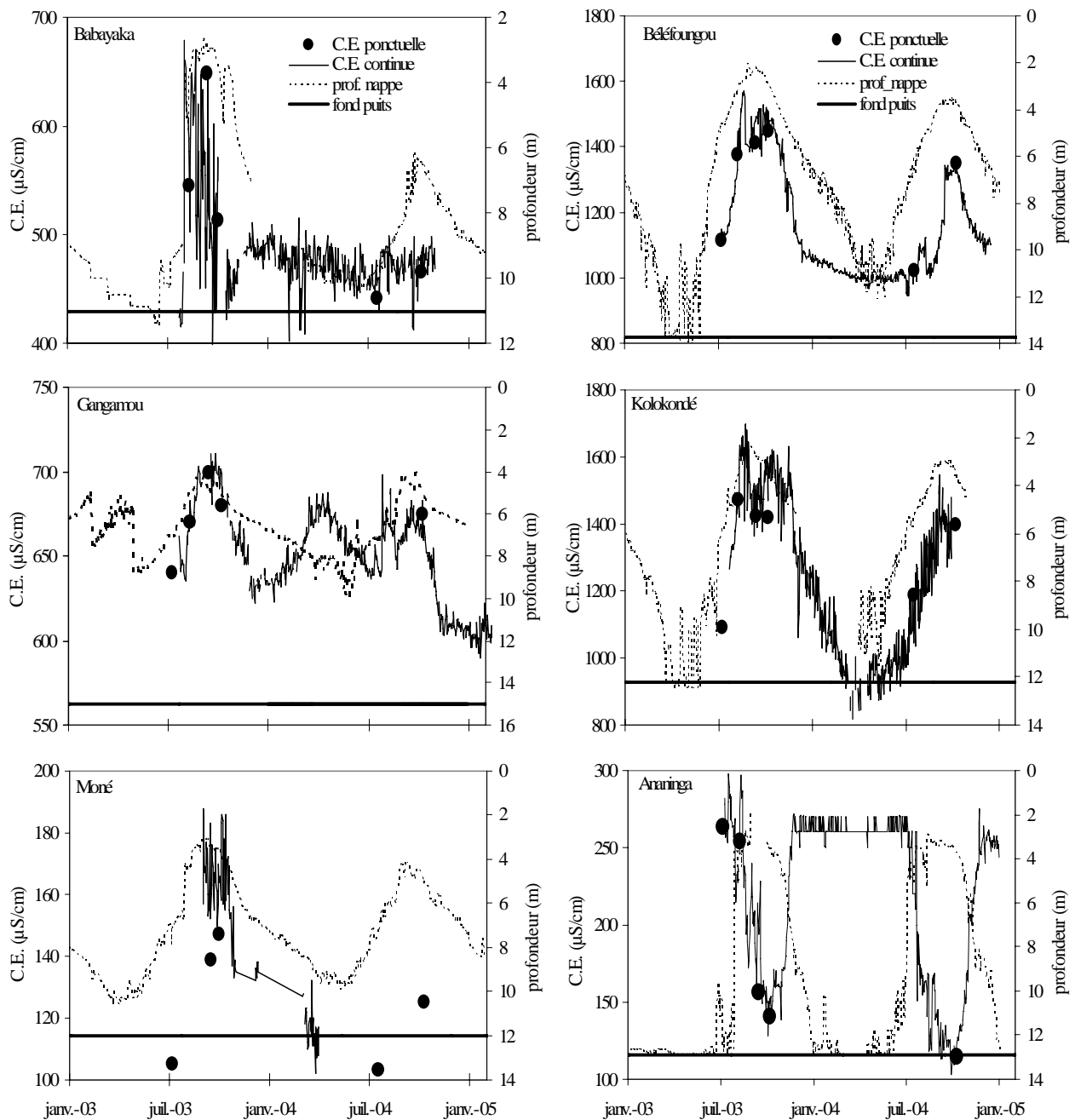


Figure 71 : Variation temporelle de la C.E. dans les réservoirs d'altérite en parallèle à la piézométrie.

Les autres stations qui n'ont pas fait l'objet d'analyse fréquentielle sont pour la plupart mesurées en juillet 2002 et février 2003 (annexe 24). Hormis la station de Kokossika qui enregistre des valeurs légèrement supérieures à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les autres se caractérisent par des conductivités toutes inférieures à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces stations peuvent donc appartenir au premier groupe A.

La répartition spatiale des 27 points de mesure en fonction des classes de C.E. indique que la majorité des points (18 sur 27 soit 66 % des puits) présente des conductivités inférieures à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, donc appartiennent au groupe A (fig. 72). La moyenne de 155 ± 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, calculée sur la base de toutes les valeurs inférieures à cette limite, du fait de la très faible variabilité saisonnière (25 $\mu\text{S}/\text{cm}$), semble donc caractéristique de la C.E. naturelle dans les réservoirs d'altérite. Les C.E. supérieures à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pourraient donc probablement traduire une pollution d'origine anthropique. D'un point de vue pédologique et géologique, les stations d'un même groupe se retrouvent sur des unités lithologiques différentes (fig. 9 et 10). L'hypothèse d'une pollution des eaux des stations du groupe B et C se trouve ainsi confortée.

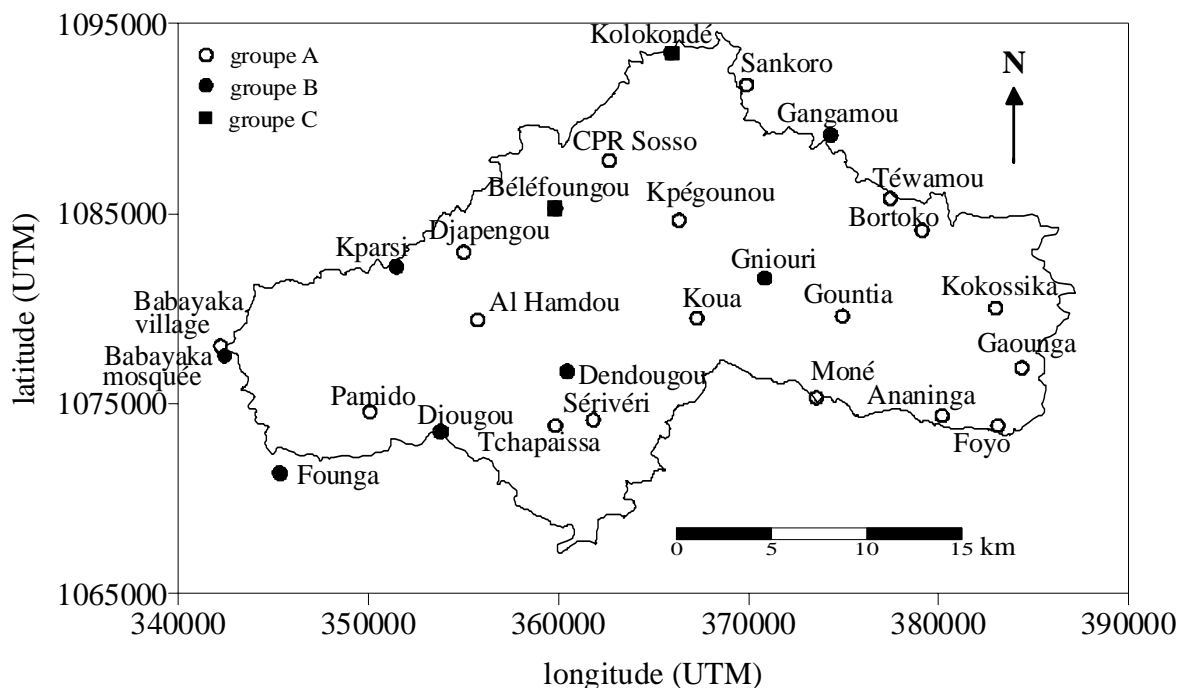


Figure 72 : Répartition spatiale des points de mesure en fonction des classes de C.E.

Réservoir de socle : comme pour les réservoirs d'altérite, des fréquences au non dépassement pour les C.E. mesurées aux 7 mêmes stations à différentes périodes, permettent de discuter des valeurs de conductivité représentatives des eaux de socle. Elles varient de 100

à 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ toutes saisons confondues avec une médiane de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 73). Contrairement aux observations faites pour les altérites, aucune séparation en groupes de conductivité ne se dégage pour les réservoirs de socle. Ceci traduit une évolution spatiale homogène de la minéralisation. On enregistre tout de même une légère variabilité saisonnière (tout comme pour le groupe A des altérites) caractérisée par une baisse de la saison sèche à la saison humide (fig. 74). La valeur maximale est enregistrée en fin de saison humide (octobre : $293 \pm 96 \mu\text{S}/\text{cm}$) et la minimale en septembre ($282 \pm 80 \mu\text{S}/\text{cm}$), soit une variation saisonnière de 11 $\mu\text{S}/\text{cm}$, inférieure à la précision de la mesure.

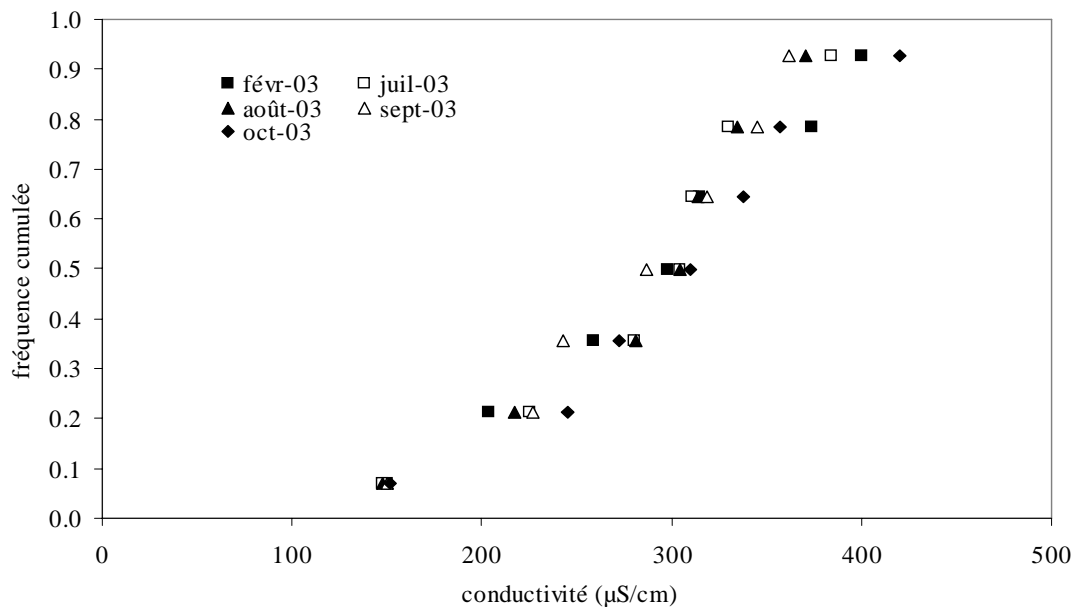


Figure 73 : Fréquence cumulée des C.E. des réservoirs de socle (n = 7).

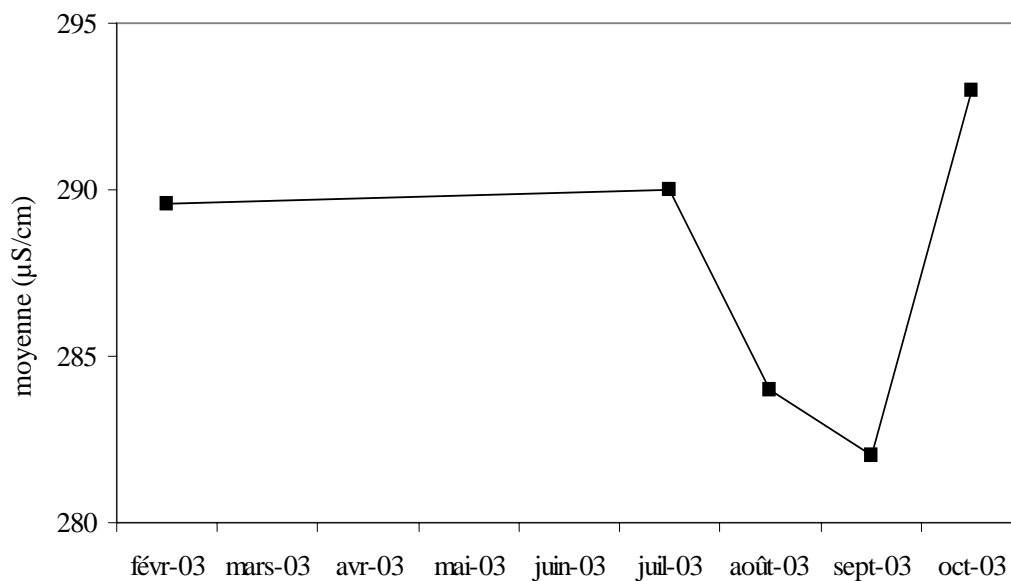


Figure 74 : Variabilité saisonnière de la C.E. pour les réservoirs de socle (n = 7).

Les 8 autres stations qui ne sont pas mesurées régulièrement présentent des conductivités comprises entre 100 et 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$; sauf la station de Béléfoungou qui enregistre des valeurs toujours supérieures à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en accord avec la valeur du puits le plus proche (appartenant au groupe C, annexe 22). Hormis cette station exceptionnelle, nous pouvons regrouper toutes les stations de socle dans un seul groupe de conductivité.

Les variations périodiques des conductivités apparaissent relativement faibles (11 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur l'ensemble des périodes d'observation) pour en tenir compte dans le choix de la valeur caractéristique des eaux de socle. La valeur représentative pourrait donc être approchée par la moyenne calculée sur la base de toutes les valeurs indépendamment des périodes de mesure. Cette moyenne est de $288 \pm 80 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Confrontation réservoirs de socle, actuel et historique : la confrontation entre la valeur caractéristique actuelle du socle ($288 \pm 80 \mu\text{S}/\text{cm}$) et celle obtenue sur la base des données historiques ($298 \pm 70 \mu\text{S}/\text{cm}$) montre une très faible variation de la conductivité électrique entre les années 1988 et les années 2003. Pris individuellement, en dehors du forage de Moné (annexe 25), tous les autres présentent des valeurs actuelles et historiques fortement comparables confirmant la relative constance temporelle de la minéralisation des eaux de socle.

Confrontation réservoirs d'altérites et de socle : confrontée à celle des réservoirs d'altérite (notamment du groupe A : $155 \pm 70 \mu\text{S}/\text{cm}$), la C.E. caractéristique du socle ($288 \pm 80 \mu\text{S}/\text{cm}$) apparaît cohérente avec un temps de résidence des eaux supposé plus long. Mais une confrontation rigoureuse doit se faire autour des couples puits/forage pour les localités où ils existent afin d'apprécier une éventuelle stratification verticale même si l'observation reste limitée aux deux seuls horizons (puits : « horizon superficiel » ; « forage : horizon profond »). Il est établi que la minéralisation des eaux souterraines provient d'une part de la nature des roches traversées au cours de l'infiltration et d'autre part du temps de contact entre l'eau et les minéraux (Sigg *et al.*, 1992 ; Appelo et Postma, 1999). Si tel est le cas, le socle recevant l'eau des couches plus superficielles devraient enregistrer des conductivités plus fortes. Ce schéma constitue en effet le cas général dans notre zone. La majorité des puits montrent des conductivités électriques plus faibles que celles des forages les plus proches. Ce schéma général est cependant inversé pour 4 couples (indiqués en gras, tableau 12), les 4 puits concernés font partir des groupes B et C. Béléfoungou montre la plus forte différence entre réservoirs d'altérite et de socle (la conductivité dans le puits est près de

2,5 fois celle mesurée dans le forage). Ceci conforte l'idée d'une pollution anthropique à l'origine des groupes B et C.

Localité	Réservoirs	Juil.	Févr.	Juil.	Août	Sept. 2003	Oct.
Al Hamdou	<i>Altérite</i>		140			96	76
	Socle		140			298	315
Ananinga	<i>Altérite</i>	257	264	263	254	156	141
	Socle	332	374	330	335	345	338
Béléfougou	<i>Altérite</i>		1014			1414	1448
	Socle		539			542	578
Djapengou	<i>Altérite</i>		79	99	96	94	97
	Socle		298	280	281	287	322
Foyo	<i>Altérite</i>		181	185		77	162
	Socle		204	304		243	272
Gniouri	<i>Altérite</i>		291	328		638	689
	Socle		264	364		360	365
Kolokondé	<i>Altérite</i>		907				
	Socle		141				
Kpars	<i>Altérite</i>		419	472	485	814	537
	Socle		416	384	371	362	357
Kpégounou	<i>Altérite</i>		163	199	217	284	234
	Socle		259	225	217	227	245
Moné	<i>Altérite</i>		114	105		139	147
	Socle		150	148		150	152

Tableau 12 : C.E. dans les réservoirs d'altérite et de socle mesurée aux puits et forages les plus proches (séparés de 20 à 130 m de distance).

- Signature des éléments majeurs

Tout comme pour la conductivité, l'analyse des signatures des ions majeurs se fera séparément pour les réservoirs d'altérite et les réservoirs de socle.

Réservoir d'altérite : pour les altérites, l'analyse est axée sur les stations du groupe A afin de dégager la signature naturelle des eaux. Les stations du groupe B serviront à évaluer une éventuelle contamination naturelle ou anthropique. On ne fera pas cas des deux seules stations du groupe C. L'analyse se fait à la fois qualitativement au moyen de diagrammes de Piper et quantitativement à partir des valeurs descriptives, notamment les compositions moyennes de chaque espèce chimique.

Le diagramme de Piper de la figure 75 est réalisé sur la base des teneurs chimiques correspondant aux conductivités extrêmes (minimale et maximale) de chaque période d'observation sur l'ensemble des puits du groupe A. Cette démarche permet une vue

d'ensemble des faciès chimiques sans toute fois représenter tous les points. Le sens de la flèche indique l'ordre chronologique de l'échantillonnage (février 2003, juillet 2003, août 2003, septembre 2003 et octobre 2003). Toutes les eaux présentent un faciès caractéristique bicarbonaté calco-magnésien. Cependant la proportion en cations demeure relativement constante tandis que les anions contribuent de façon variable au chimisme des eaux. On passe d'eaux hyper bicarbonatées à des eaux bicarbonatées, de la saison sèche à la saison humide. Ceci se traduit par un enrichissement en Na et/ou K et Cl et/ou NO_3 et un appauvrissement en Ca et/ou Mg et HCO_3 au cœur de la saison humide fixé en septembre et correspondant au pic piézométrique. Le bicarbonate et le calcium sont les éléments chimiques dissous dominants. La baisse saisonnière de leur proportion pourrait justifier celle de la conductivité mise en évidence précédemment.

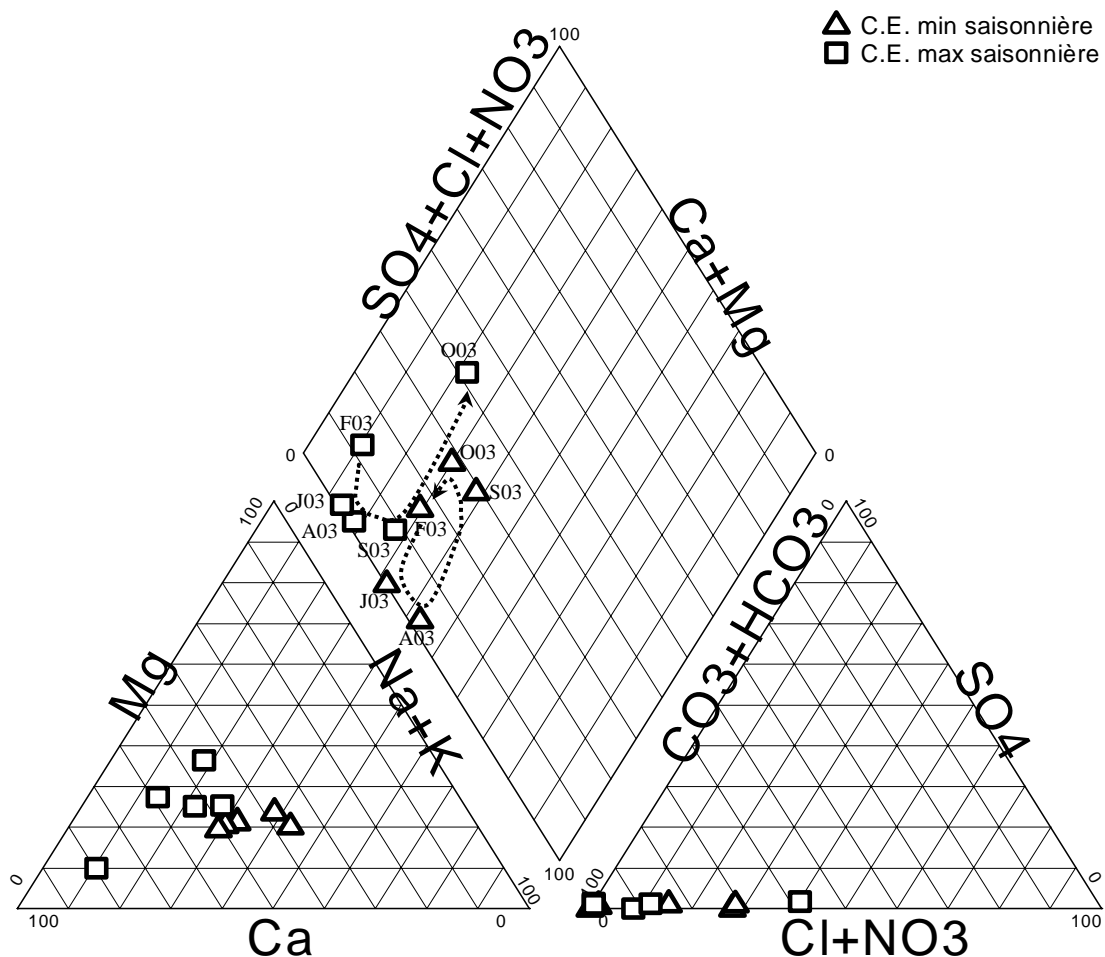


Figure 75 : Diagramme de Piper pour les plus faibles et fortes valeurs saisonnières de la C.E. pour le groupe A (sens de la flèche = ordre chronologique des campagnes : février 2003 (F03), juillet 2003 (J03), août 2003 (A03), septembre 2003 (S03) et octobre 2003 (O03)).

Du point de vue quantitatif, nous avons calculé la moyenne des teneurs pour chaque espèce chimique pour les groupes A (8 échantillons) et B (7 échantillons) pour les périodes correspondant aux valeurs extrêmes de conductivité (février et septembre 2003).

L'élément Si est de loin le plus dominant, sa concentration moyenne est d'environ de $27,2 \pm 3,9$ mg/l pour le groupe A et $33,9 \pm 0,9$ mg/l pour le groupe B. Il n'existe pas d'analyse pour cet élément en septembre.

Pour les autres éléments, l'ordre d'importance se présente de la façon suivante : $K < Na$ ou $Mg < Ca$ pour les cations et $SO_4 < Cl$ ou $NO_3 < HCO_3$ pour les anions pour février et septembre (fig. 76) pour les deux groupes, en accord avec le faciès chimique mis en évidence précédemment.

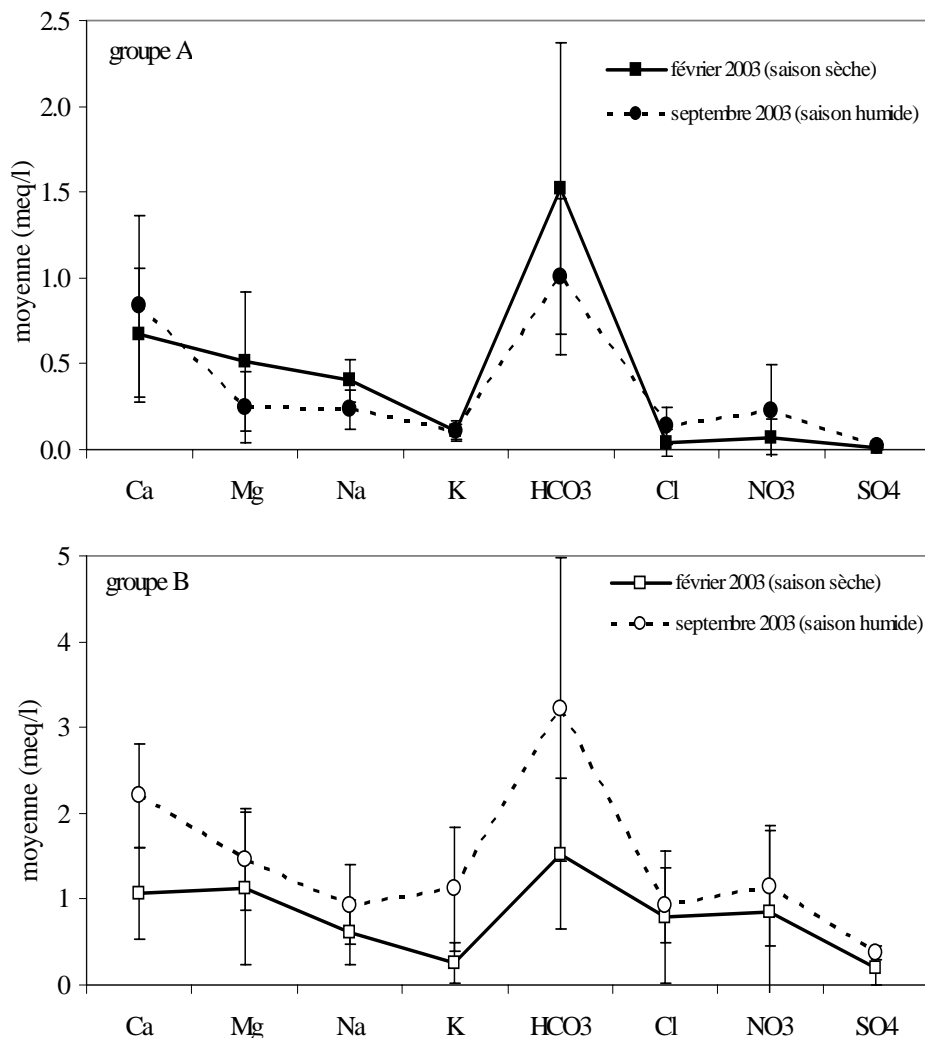


Figure 76 : Concentrations moyennes en ions majeurs pour les groupes A (n=8) et B (n=7) pour les mois de février 2003 (saison sèche) et septembre (saison humide).

De février à septembre, une baisse sensible, de l'ordre de 50 à 70 %, est observée pour les éléments Mg, Na et HCO_3 du groupe A. Quantitativement, cette baisse saisonnière explique bien la diminution de la conductivité électrique constatée précédemment pour ce groupe (fig. 70). L'ordre d'importance des éléments est globalement conservé pour le groupe B mais avec des teneurs plus importantes. De février à septembre, tous les éléments ont connu une hausse sensible de leur concentration moyenne, en accord avec la hausse saisonnière de la C.E.. La distinction du groupe B, n'est donc pas exclusivement liée à un seul élément.

Ca, Mg, Na et HCO_3 sont les produits classiques de l'altération des roches silicatées. Leurs concentrations dans l'eau demeurent généralement très peu influencées par les pollutions anthropiques. N, K, Cl sont souvent issus des pollutions fécales, K et NO_3 de pollution agricole. Mais en Afrique, de fortes teneurs en chlorure et nitrate ont été attribuées à des origines naturelles pédologiques. Dans des nappes de fissure en Côte d'Ivoire, en milieu tropical humide, les fortes teneurs en nitrate sont attribuées à la déforestation (Faillat, 1990). En dehors des évaporites (l'anhydride ou le gypse : CaSO_4) et des sulfures (pyrite : FeS_2) rares dans notre zone, SO_4 ne peut provenir que des fertilisants soufrés ou même des lessives souvent pratiquées aux alentours des puits servant aux mesures physico-chimiques.

La particularité du groupe B apparaît donc comme la combinaison de processus de minéralisation d'origine endogène à l'aquifère (minéralisation naturelle) et d'origine exogène (pollution anthropique).

Réservoir de socle : les faciès chimiques pour les eaux de socle correspondant aux conductivités maximale et minimale par période de mesure sont indiqués dans le diagramme de Piper de la figure 77. Toutes les eaux sont bicarbonatées calco-magnésiennes. Ce faciès est identique à celui obtenu pour les altérites. Mais ici, l'enrichissement en chlorure et nitrate durant la saison humide est très amorti. On peut donc affirmer que la signature chimique naturelle des eaux souterraines est globalement homogène et reste dominée par le faciès bicarbonaté calco-magnésien.

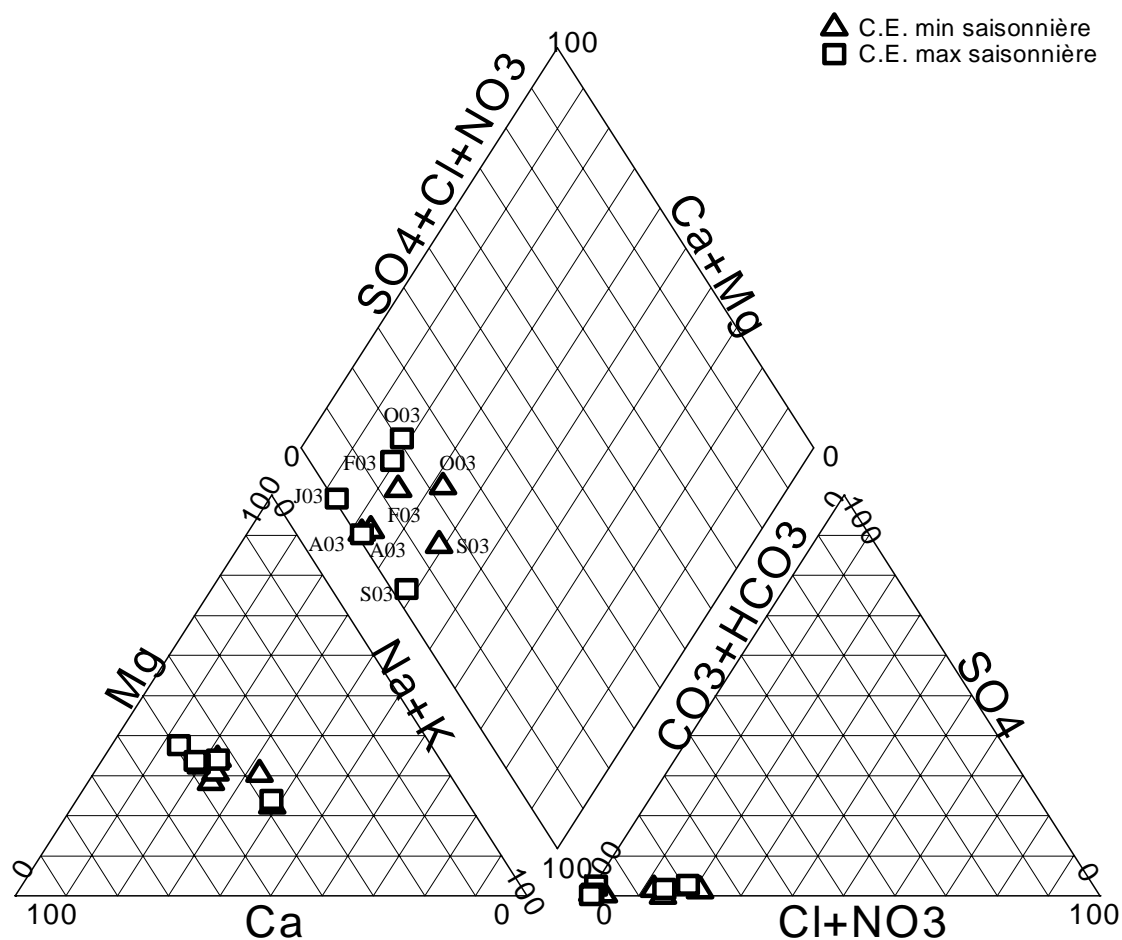


Figure 77 : Diagramme de Piper pour les plus faibles et plus fortes valeurs saisonnières de C.E. du réservoir de socle ; (sens de la flèche = ordre chronologique des campagnes, février 2003 (F03), juillet 2003 (J03), août 2003 (A03), septembre 2003 (S03) et octobre 2003 (O03).

Du point de vue quantitatif, les compositions spécifiques moyennes obtenues sur la base de toutes les analyses ont été calculées. L'élément Si, avec une moyenne de $34,80 \pm 5,02$ mg/l contre $27,2 \pm 3,9$ mg/l pour les altérites (groupe A), est l'élément dominant. Pour les autres éléments, l'importance des teneurs suit le même ordre que précédemment : $K < Na < Mg < Ca$ pour les cations et $SO_4 < NO_3 < Cl < HCO_3$ (fig. 78). Le bicarbonate est l'anion dominant avec une concentration plus de 2 fois supérieure à celle des autres anions. Les réservoirs de socle sont logiquement plus enrichis en éléments relevant de l'altération des roches endogènes (Ca, Mg, Na, K et HCO_3). Mais ceux relevant de pollution éventuelle (Cl, NO_3 et SO_4) présentent des teneurs moyennes quasiment identiques. Contrairement aux

altérites, la variabilité saisonnière est moins importante, en accord avec la faible variation de la C.E. (variation maximale : 11 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

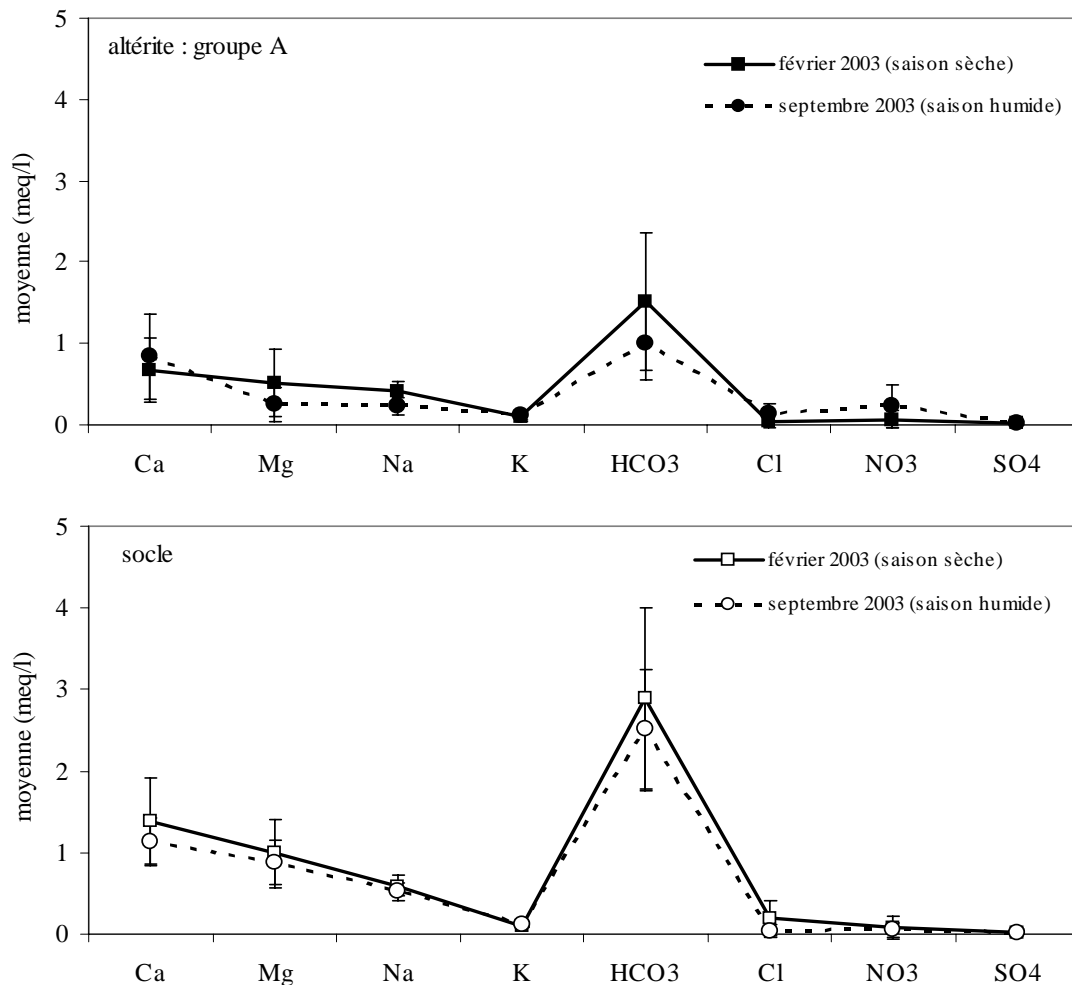


Figure 78 : Comparaison des concentrations moyennes en ion majeurs dans les eaux de socle et des altérites du groupe A en février 2003 (saison sèche) et septembre 2003 (saison humide).

Confrontation réservoirs de socle, actuel et historique : la confrontation entre les teneurs moyennes historiques et récentes dans le socle, calculées sur la base des concentrations aux mêmes stations est présentée dans la figure 79. Les moyennes sont quasiment identiques lorsqu'on considère les écart-types. L'ordre d'importance ionique est également inchangé. Les processus régissant donc la mise en solution d'éléments dissous n'ont pas évolué avec le temps en accord avec la conductivité électrique. On observe en revanche des teneurs moyennes anciennes plus fortes pour toutes les espèces chimiques sans les écart-types. Cette évolution est contraire à ce qu'on pourrait attendre. En effet, le temps de résidence augmentant, les eaux actuelles devraient être plus minéralisées. Le cas contraire

pourrait s'expliquer soit par la différence des méthodes analytiques entraînant la surestimation des valeurs anciennes, soit par un renouvellement continu des stocks d'eau mis en place après chaque saison pluvieuse, annulant ainsi l'effet mémoire du réservoir souterrain.

On peut donc conclure que la signature physico-chimique des nappes de socle n'a pas connu d'évolution importante sur les dix dernières années.

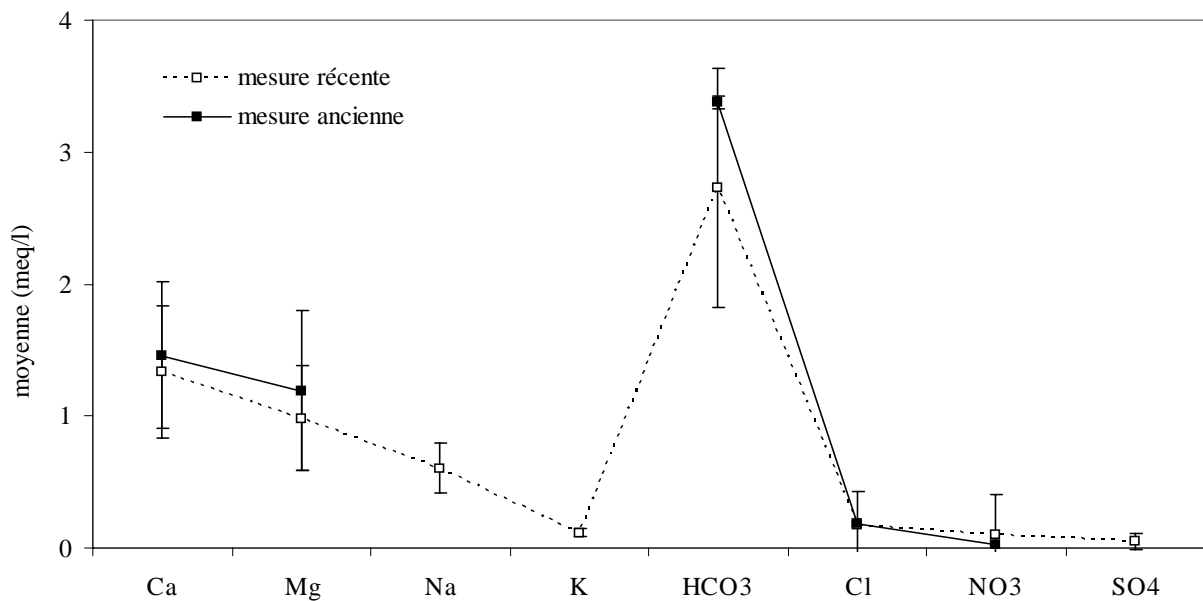


Figure 79 : Compositions moyennes anciennes et récentes en ions majeurs pour les eaux de socle.

- Signature des éléments traces

Réservoir d'altérite : la détermination des éléments traces porte sur l'ensemble des échantillons ayant fait l'objet d'analyse des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs. L'analyse concerne essentiellement les puits du groupe A. Le groupe B est mentionné à titre indicatif. On procédera par une simple analyse des moyennes spécifiques, calculées tout comme pour les éléments majeurs, sur la base des variations saisonnière de la C.E. La figure 80 présente graphiquement les teneurs moyennes spécifiques pour les mois de février (saison sèche) et septembre (saison humide) correspondant respectivement aux maximum et au minimum saisonnier de la C.E. pour le groupe A. Elle met en évidence l'ordre d'importance des éléments qui se conserve dans le temps. Des pics positifs correspondants aux plus fortes teneurs sont enregistrés pour Sr (environ 140 µg/l), Ba (environ 106 µg/l), Al (environ 42 µg/l) et Mn. Seule la composition en Mn a connu une baisse importante, de la saison sèche (39 µg/l) à la saison humide (6 µg/l). Ces éléments sont strictement identiques à ceux qui dominent la signature des éléments traces dans les précipitations. Sr se trouve dans la

quasi-totalité des roches connues et demeure extrêmement mobile contrairement aux autres éléments. Il a théoriquement des compositions importantes et variables dans les horizons peu profonds et des compositions relativement constantes en profondeur. Ba provient de la décomposition des sulfates de baryum ($BaSO_4 =$ barytine). Mais, Ba peut être d'origine magmatique ou sédimentaire. Dans un contexte comme le bassin de la Donga où l'on trouve aussi bien des roches magmatiques que des roches sédimentaires dont le métamorphisme peut produire $BaSO_4$, il apparaît donc logique de rencontrer Ba en concentration importante. Les éléments métalliques Al et Mn pourraient trouver leur origine dans les argiles constitutives du réservoir d'altérite. D'autres éléments, notamment Li, B et Cr (figure 80) présentent des concentrations plus faibles, mais relativement importantes. B a connu une hausse (du fait d'une influence probable du Bore épandu dans les champs de coton) tandis que Cr une baisse de la saison sèche à la saison humide. Les plus faibles teneurs sont enregistrées pour As, Co, Mo, Pb et U.

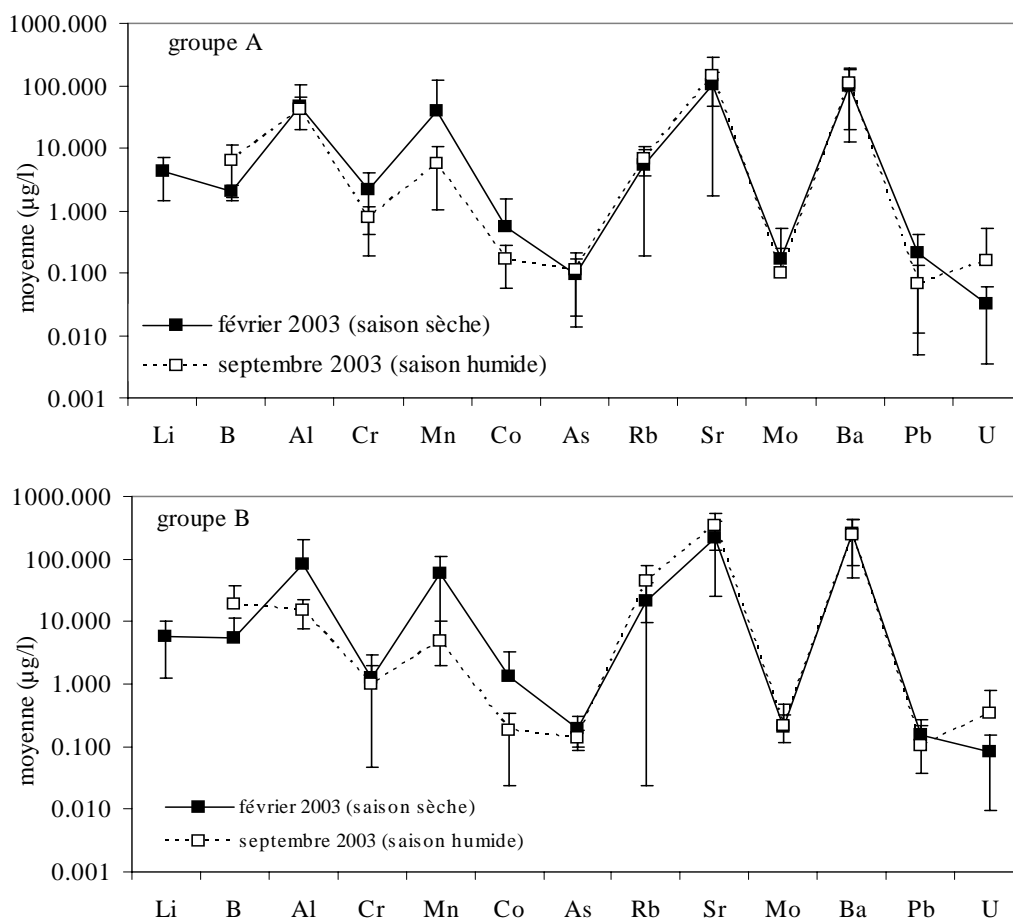


Figure 80 : Concentration moyenne en éléments traces pour les groupes A et B en février 2003 (saison sèche) et septembre 2003 (saison humide).

Réservoir de socle : pour les réservoirs de socle, l'analyse se fait à partir des teneurs moyennes extrêmes saisonnières, toujours sur la base de la variabilité de la C.E. Les pics positifs sont enregistrés pour Al, Mn, Sr, Ba et Li (fig. 81). A l'exception de Li, ces éléments présentaient les plus fortes teneurs dans les altérites, avec Rb qui semble plus faible dans le socle. Suivent B, Cr et les autres. Tout comme dans les altérites, tous les éléments ne contribuent pas à la variabilité saisonnière de la C.E. Les plus importantes baisses sont enregistrées pour les éléments B et Al. Contrairement aux autres éléments qui ont connu soit une baisse, soit une constance de leur teneur, As présente une hausse.

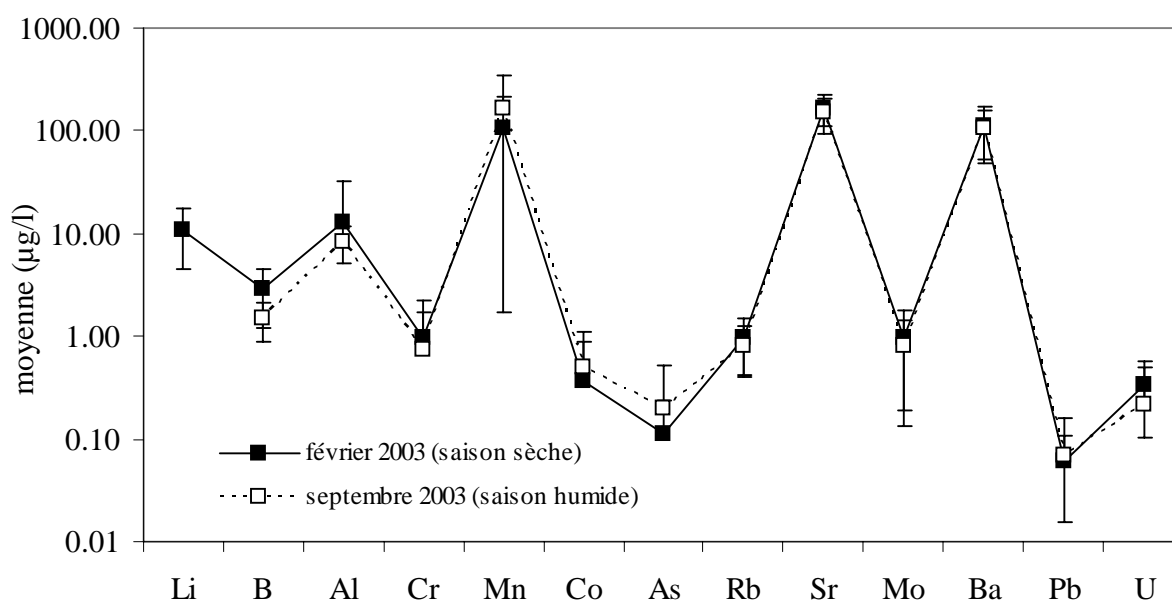


Figure 81 : Comparaison entre la concentration moyenne en éléments traces des eaux de socle et des altérites.

▪ Échelle d'un versant

La physico-chimie des réservoirs souterrains est abordée une seconde fois au moyen des forages expérimentaux de profondeurs 2, 10 et 20 m installés le long de la toposéquence expérimentale. L'échantillonnage a eu lieu lors de la saison humide 2004. Deux trous de 1 m de profondeur ont été forés à l'aide d'une tarière manuelle au voisinage des forages expérimentaux. Les C.E. et les teneurs en éléments majeurs et traces sont également pris en compte. Le prélèvement des échantillons d'eau s'est fait à l'aide d'un tube cylindrique en plastique suspendu à un fil. Le traitement et le protocole analytique des échantillons sont identiques à ceux décrits précédemment (chapitre IV.2.3.2). Le nombre d'analyses effectuées sur chaque site en fonction de la profondeur est mentionné dans le tableau 13.

Profondeur (m)	Station		
	Amont	Milieu	Aval
2	4	5	5
10	5	6	6
20	5	7	6

Tableau 13 : Nombre d'échantillons analysés par station.

- T° et pH

Les valeurs moyennes de la température mesurées à différentes profondeurs (2, 10 et 20 m) aux stations Amont, Milieu et Aval sont indiquées dans la figure 82.

Une nette différence apparaît aux piézomètres de 2 m entre les 3 sites. Cette différence se caractérise par une hausse de 27,5 à 28,5 °C d'amont en aval du versant. Cette distinction est moins visible à 10 et 20 m où les valeurs sont très proches de 28,5 °C. On retient donc l'absence de variabilité aussi bien spatiale que verticale de la température au delà de 2 m de profondeur. Par ailleurs, les valeurs restent comparables à celles obtenues dans les réservoirs d'altérite pour l'ensemble du bassin (environ 28 °C).

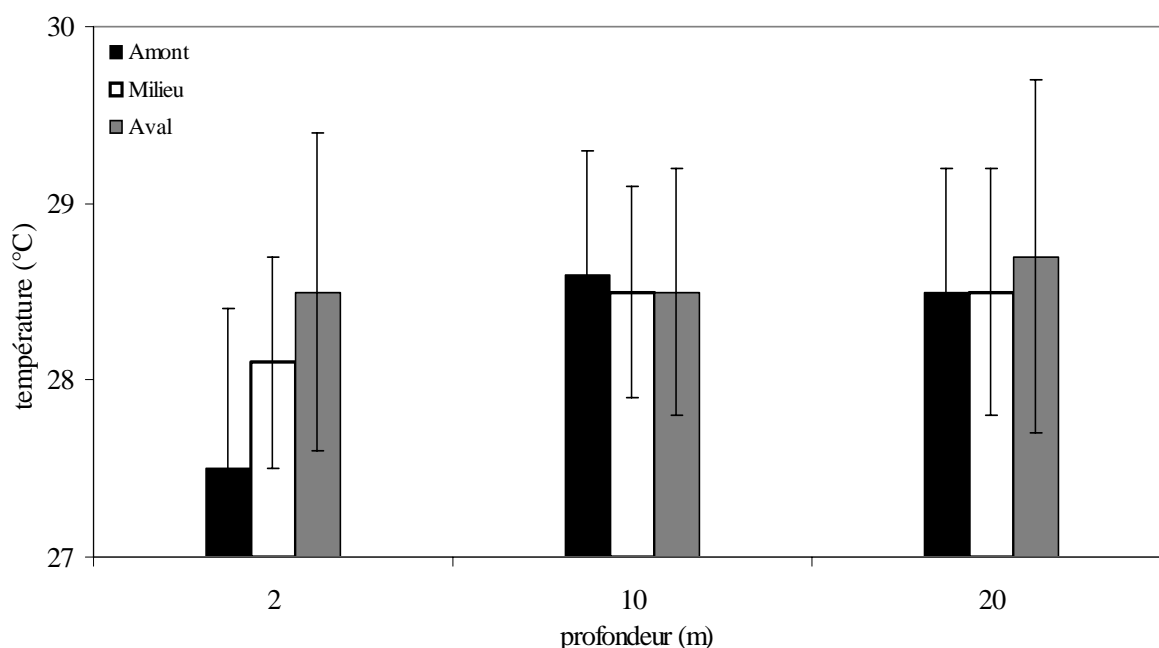


Figure 82 : Température moyenne pour les profondeurs de 2, 10 et 20 m aux stations Amont, Milieu et Aval.

Les valeurs moyennes de pH sont indiquées dans la figure 83. Pour les profondeurs de 2 m, la station Aval apparaît plus acide (5,8) que les deux autres (Amont : 6,0; Milieu : 6,2). L'acidité des eaux relevant majoritairement du CO₂ dissous, l'importance des activités biogéniques de la végétation à cette profondeur et à cette station (présence de forêt galerie au bas du versant) pourrait expliquer cette particularité. Mais l'oxydation des sulfures de fer (tels que la pyrite) avec production des oxydes de fer de couleur rouille, peut aussi émettre dans le milieu des quantités importantes d'ions H⁺, responsables de la chute du pH. Cette deuxième hypothèse semble plausible du fait de la présence effective de dépôts de couleur rouille à cette station. Mais sur la base de cette hypothèse, les eaux de cette station devraient contenir des teneurs relativement importantes en SO₄. Pour les profondeurs de 10 et 20 m, en dehors de la station Amont à 10 m, les valeurs moyennes du pH sont très proches et avoisinent 6,5. Cette valeur est comparable à celle déjà observée pour les eaux d'altérite à l'échelle de l'ensemble du bassin.

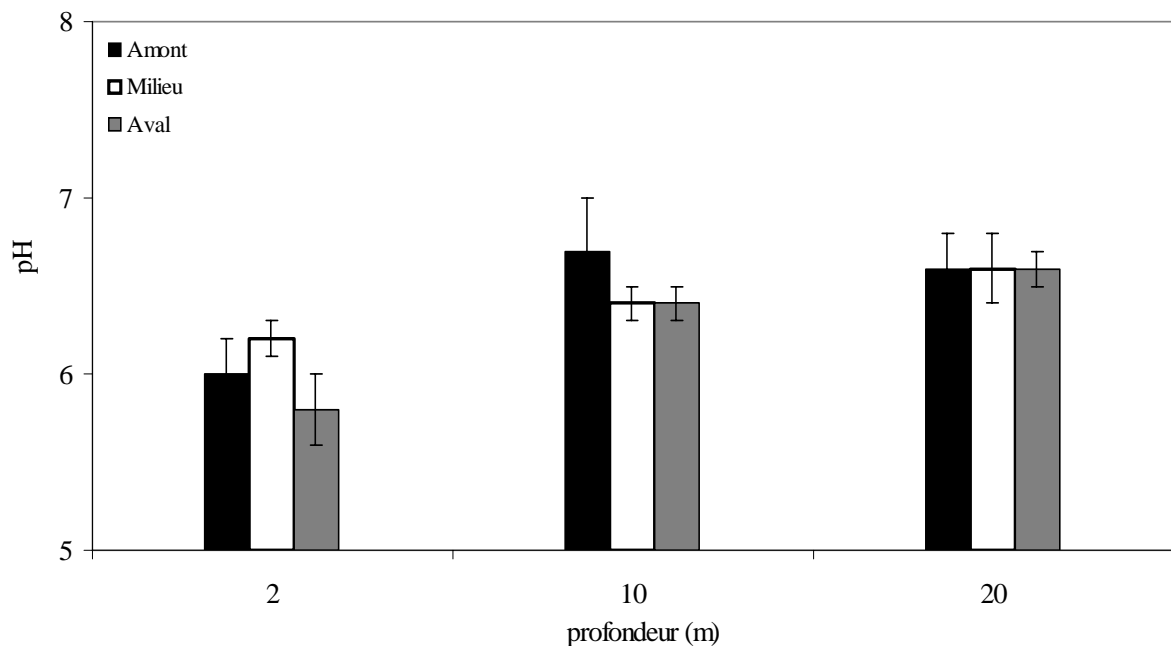


Figure 83 : pH moyen pour les profondeurs de 2, 10 et 20 m aux sites Amont, Milieu et Aval.

- Conductivité électrique

Les sites expérimentaux ont fait l'objet, à la fois de mesures ponctuelles et de mesures discrètes (tous les 2 jours) de la conductivité électrique des eaux. Sur la base de l'ensemble de ces mesures, on peut apprécier sa variation temporelle à l'échelle du versant, toujours aux stations Amont, Milieu et Aval.

Pour les mesures à 2 m de profondeur, les valeurs varient de 30 à 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et restent globalement très comparables, toutes stations et toutes périodes confondues. Cette gamme étendue de variation montre une baisse importante entre août et septembre, traduisant une forte sensibilité de cet horizon aux fortes précipitations (fig. 84). Une légère augmentation des valeurs s'en suit, suivie d'une relative stabilité, bien visible à la station Aval à la fin de la saison humide.

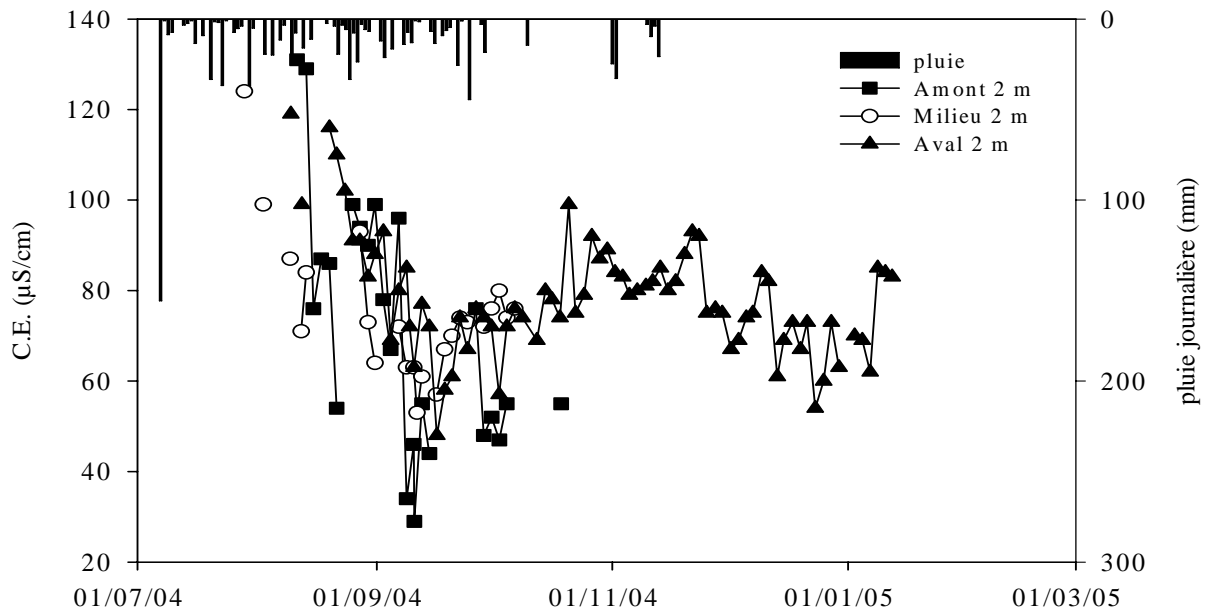


Figure 84 : Évolution temporelle de la C.E. à 2 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval en parallèle à la pluie journalière (station pluviométrique de Nalohou) en 2004.

Pour les piézomètres de 10 et 20 m, les fluctuations sont indiquées dans la figure 85. En Amont, les C.E. sont relativement constantes pour les deux profondeurs et sont toutes inférieures à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. À la station Milieu, on observe une forte baisse de plus de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en début de saison humide pour les deux profondeurs. Les valeurs tendent ensuite à se stabiliser autour de 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20 m et passent en dessous de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 10 m. À la station Aval, les valeurs sont les plus élevées (supérieures à 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$). On y enregistre en plus une forte augmentation au cœur de la saison de près de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les fluctuations de C.E. typiques à chaque station confortent l'idée de l'existence de discontinuités hydrauliques d'amont en aval du versant expérimental, déjà signalées par les observations pétrographiques et géophysiques (cf. chapitre II, Descloitres *et al*, 2003 ; Robain et Wubda, 2004).

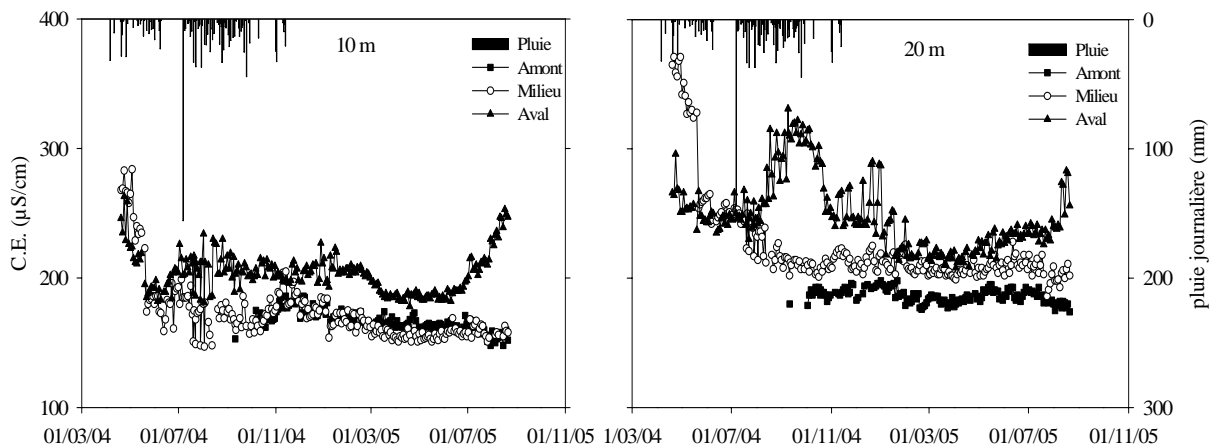


Figure 85 : Évolution temporelle de la conductivité électrique à 10 et 20 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval en parallèle à la pluie journalière (station pluviométrique de Nalohou) en 2004.

On retient donc une forte dépendance des horizons de 2 m aux précipitations et une augmentation logique de la conductivité avec la profondeur. Cette augmentation apparaît de plus en plus faible entre 10 et 20 m et traduirait l'existence d'un unique réservoir capté par ces deux profondeurs.

Spatialement, des discontinuités chimiques se dégagent en accord avec les diverses ruptures verticales qui apparaissent dans les profils électriques réalisés lors des prospections géophysiques (Descloitres *et al.*, 2003). La différence de faciès chimiques doit donc plutôt provenir de variations latérales des sols plutôt que des différences dans la composition chimique des pluies.

- Signature des ions majeurs

Les deux échantillons de 1 m de profondeur ont un faciès bicarbonaté dont l'un à tendance calco-magnésienne et l'autre à tendance sodi-potassique (fig. 86) témoignant d'une relative instabilité des signatures dans cet horizon plus exposé aux eaux météoriques.

À 2 m, les eaux sont bicarbonatées calco-magnésiennes en Amont, bicarbonatées calco-magnésiennes à bicarbonatées sodi-potassiques au Milieu et bicarbonatées sodi-potassiques en Aval. Ceci témoigne d'une grande variabilité spatiale des signatures confirmant l'instabilité mise en évidence pour l'horizon 1m. Aussi, les faciès chimiques ne sont pas homogènes pour une même station, notamment à la station Aval où de très fortes variations sont enregistrées, "tirées" par un pôle fortement sodi-potassique.

Ces observations traduisent la très grande complexité dans la détermination des faciès chimiques aux horizons 1 et 2 m en accord avec la forte variabilité de la C.E.. Ces horizons sont assimilables à la zone non saturée dont le fonctionnement reste complexe.

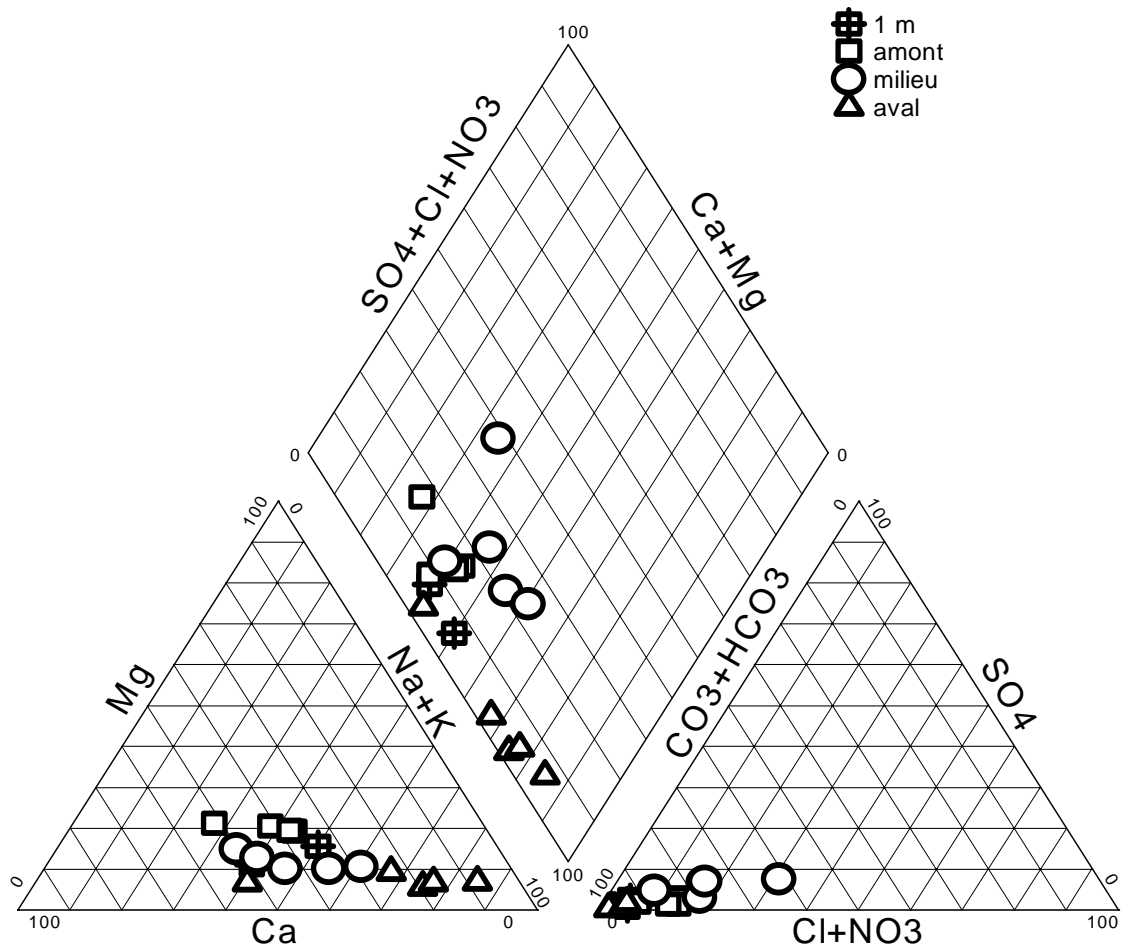


Figure 86 : Diagramme de Piper des eaux à 1 et 2 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval.

À 10 m, les eaux sont bicarbonatées avec des proportions relativement identiques en cations en Amont et au Milieu. Elles restent bicarbonatées mais plus sodi-potassiques en Aval (fig. 87). Ceci suggère un enrichissement progressif en Na et K au détriment de Ca et Mg, d'amont en aval. Les faciès sont également très homogènes à l'intérieur d'une même station. À 20 m, les faciès semblent plus proches et donc plus homogènes avec une légère variation en Aval.

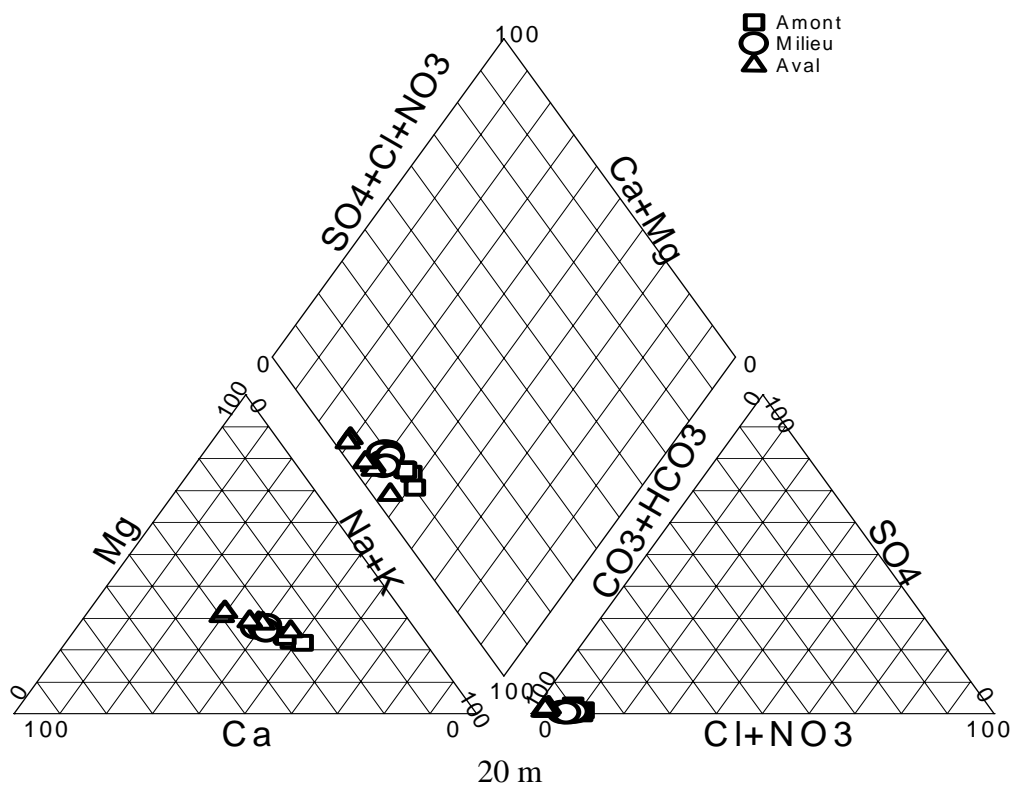
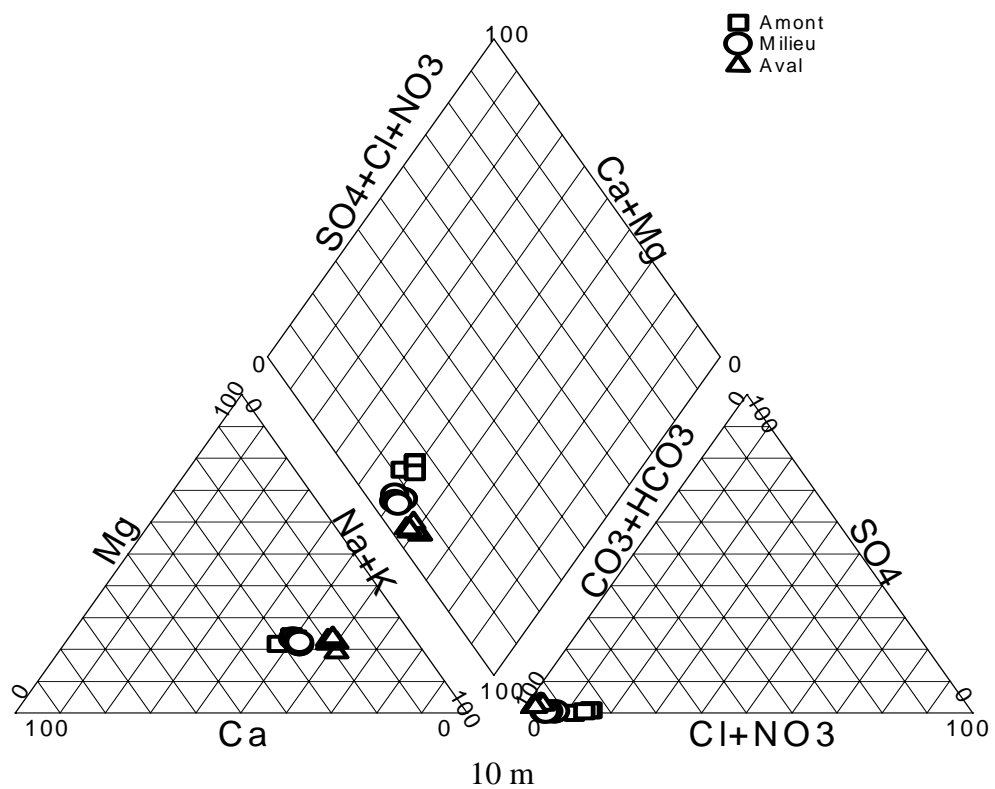


Figure 87 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées à 10 et 20 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval.

Quantitativement, on note des variabilités chimiques temporelles plus ou moins importantes selon les stations.

Une relative constance des teneurs en Si se dégage pour la station Milieu par rapport aux autres stations (fig. 88) avec en moyenne 34, 146 et 153 mg/l respectivement pour les profondeurs 2, 10 et 20 m. Pour les autres stations, de faibles variabilités temporelles apparaissent, mais sans aucune logique particulière.

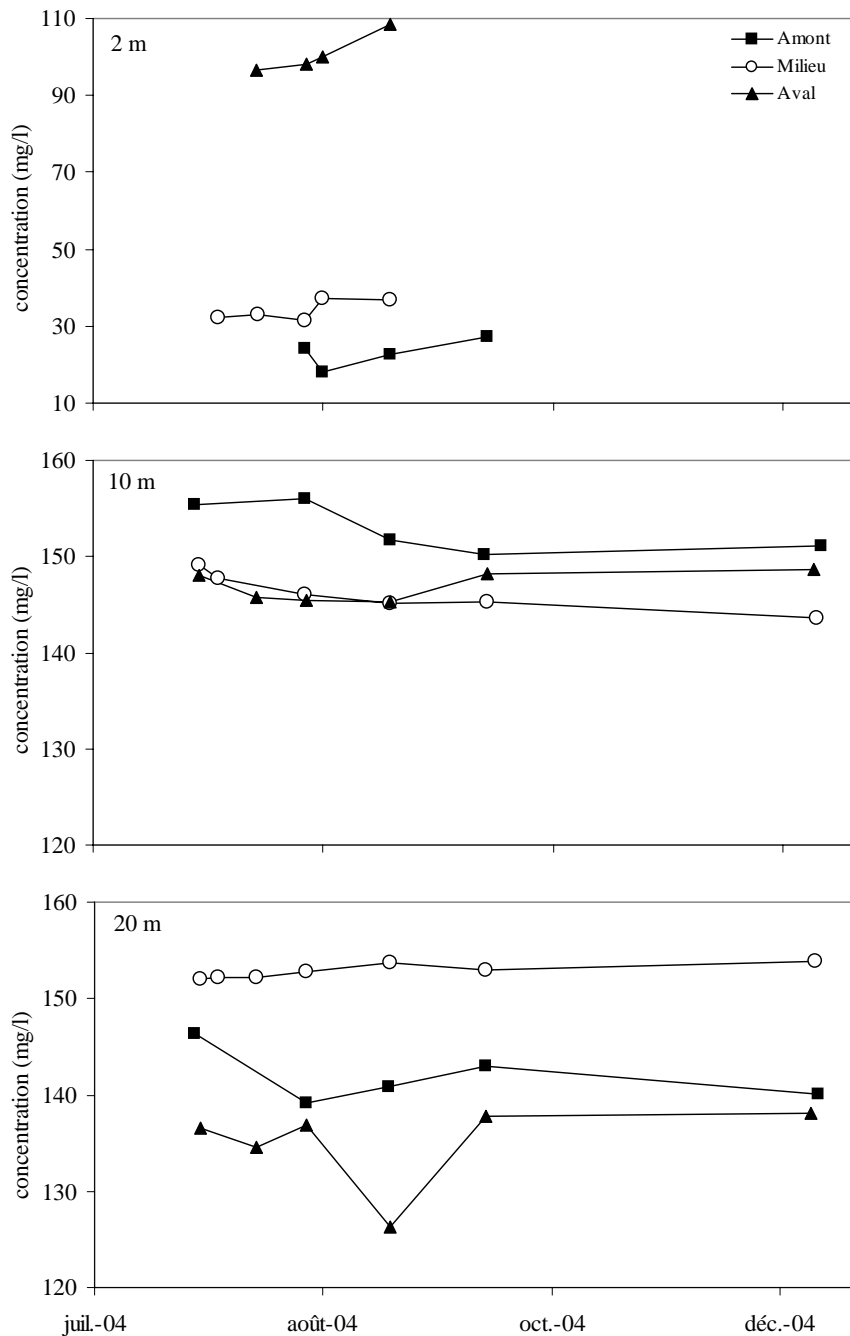


Figure 88 : Variation temporelle des teneurs en silicium à différentes profondeurs aux stations Amont, Milieu et Aval pendant la saison pluvieuse 2004.

Sur le site Amont, la dynamique piézométrique marque une forte oscillation à 2 m en accord avec la conductivité, avec une tendance générale à la baisse. Tous les éléments chimiques semblent subir une chute qui perdure au cœur de la saison pluvieuse (septembre) suivie d'une légère hausse en fin de saison (fig. 89). La plus forte baisse est observée pour Ca et HCO₃. Dans les forages de 10 m, les conductivités sont relativement constantes, indépendamment de la pluviométrie, mais les éléments présentent une légère tendance à la décroissance après le début de la saison humide. Na devient plus important que Ca, marquant ainsi une inversion de l'importance ionique visible également dans les horizons de 20 m où les variations semblent toutes aussi faibles.

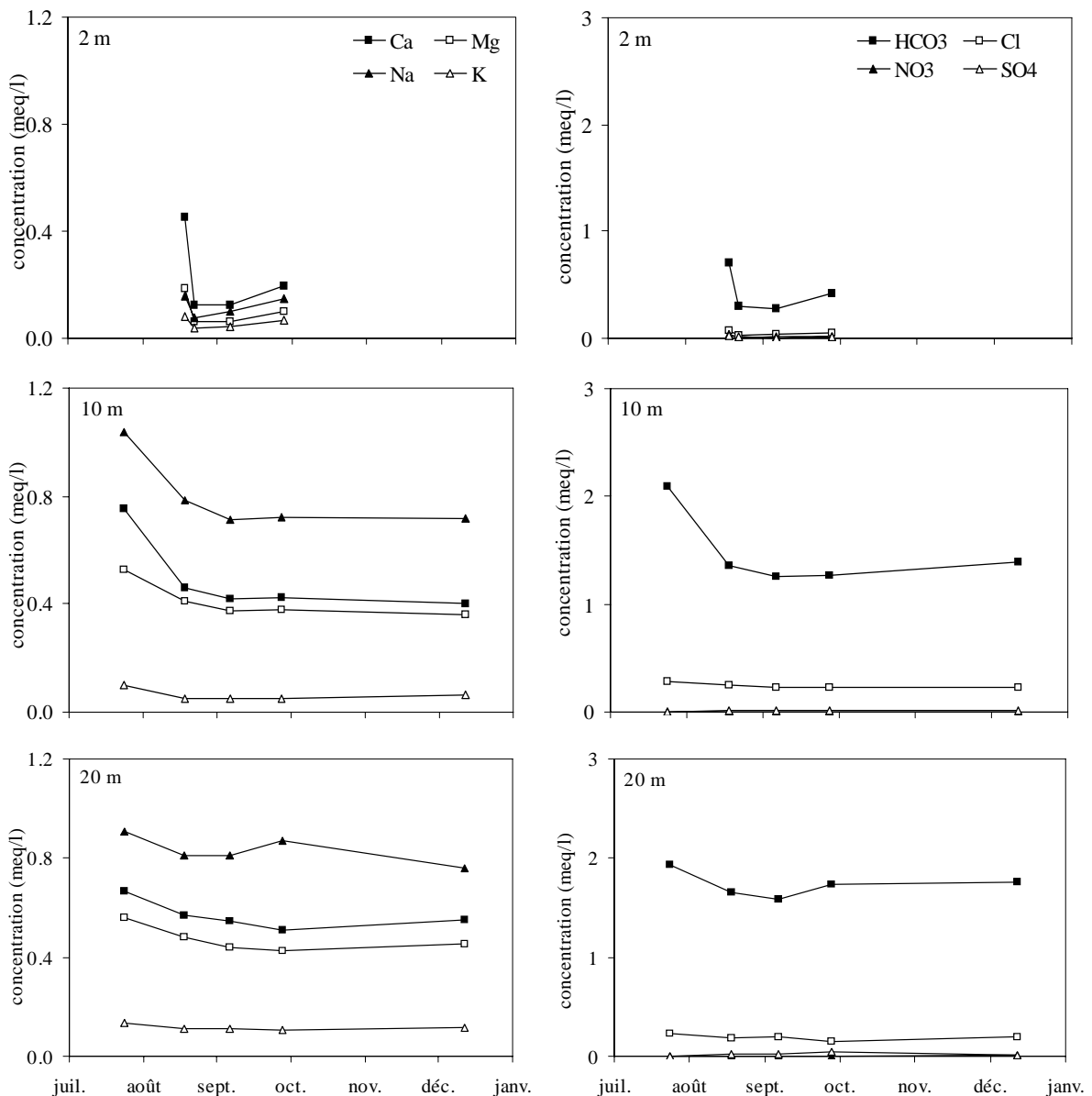


Figure 89 : Variation temporelle des teneurs en ions majeurs à 2, 10 et 20m à la station Amont pendant la saison pluvieuse 2004.

Sur le site Milieu, les teneurs à 2 m marquent une légère baisse (plus importante pour Ca, Na et HCO₃) alors que les teneurs à 10 m sont relativement constantes (Na toujours dominant) malgré la fluctuation piézométrique, en accord avec l'évolution de la conductivité après la chute de début de saison (fig. 90). À 20 m, les variations sont également faibles avec des teneurs en Ca et Na proches.

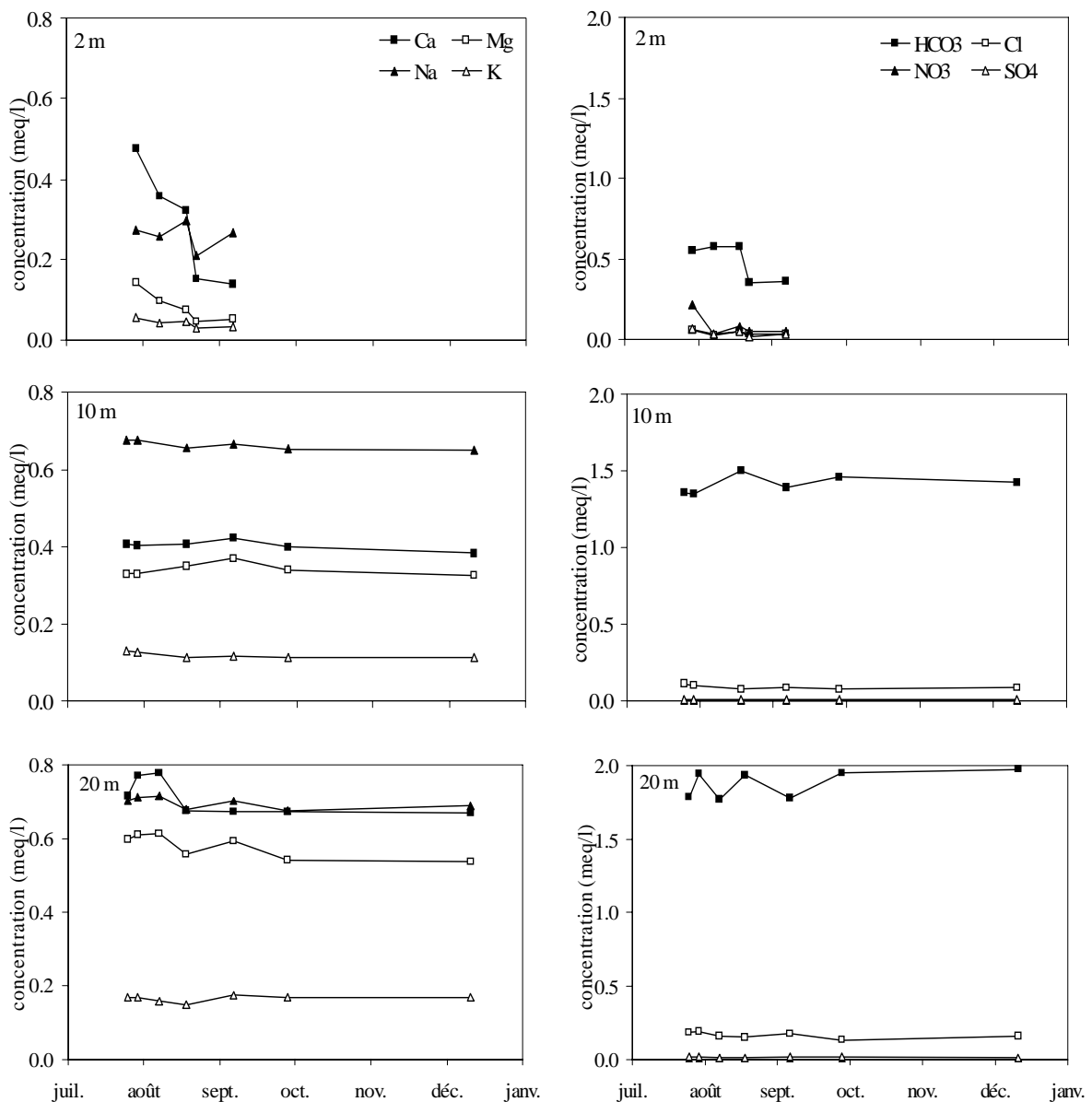


Figure 90 : Variation temporelle des teneurs en ions majeurs à 2, 10 et 20m à la station Milieu pendant la saison pluvieuse 2004.

Sur le site Aval, les fluctuations des compositions semblent identiques à celles observées aux deux autres stations. Dans les forages de 2 m, seuls Ca et HCO₃ marquent une baisse importante comme en amont. Mais ici également, la teneur en Na prend de

l'importance par rapport à Ca (fig. 91). À 10 m, les teneurs sont globalement constantes avec un ordre d'importance ionique identique aux deux premières stations. À 20 m, les fluctuations semblent plus importantes.

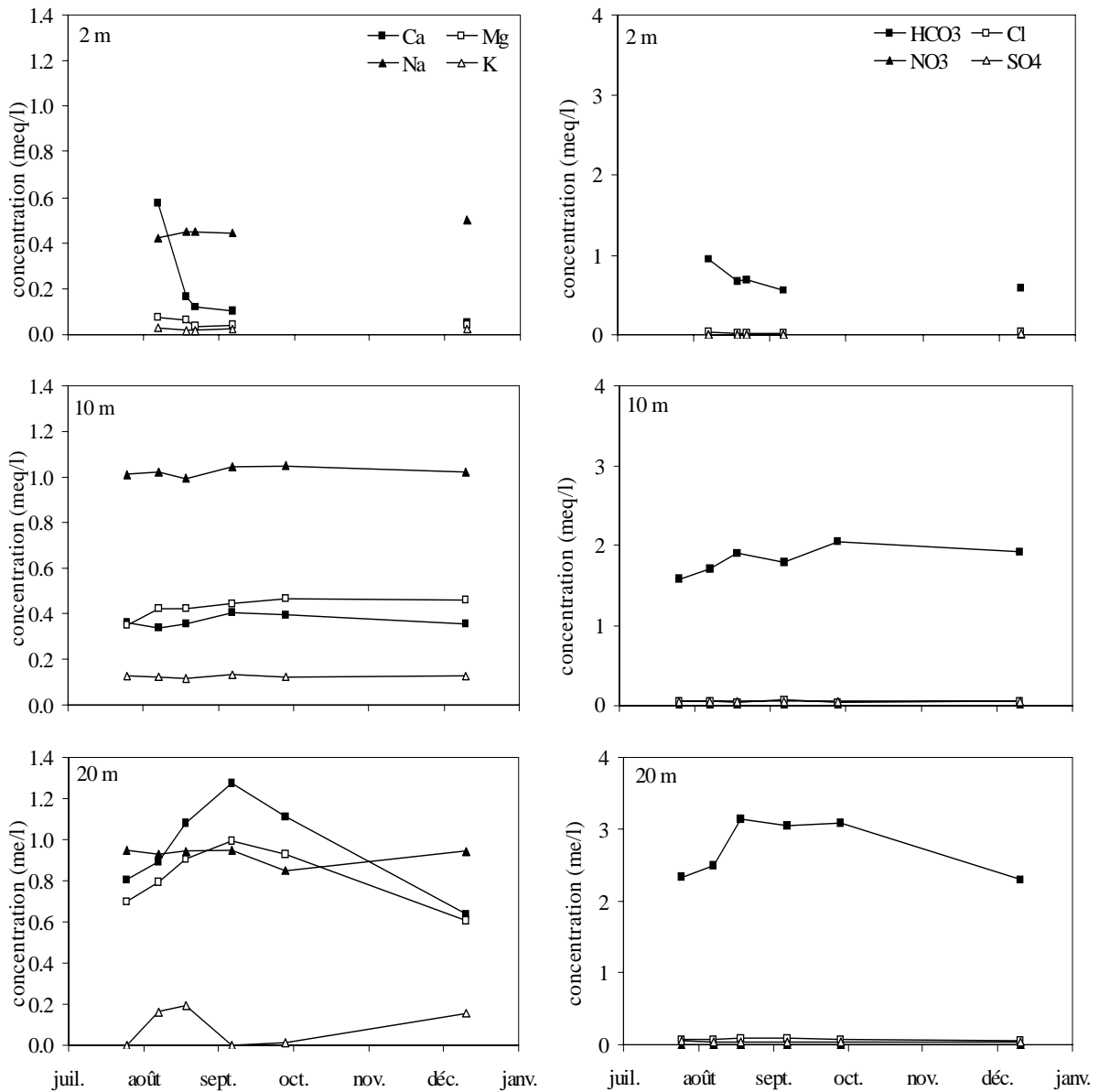


Figure 91 : Variation temporelle des teneurs en ions majeurs à 2, 10 et 20m à la station Aval pendant la saison pluvieuse 2004.

La très grande variabilité des faciès chimiques, aussi bien verticalement qu'horizontalement, confirme la complexité de la zone. La différence fondamentale entre ces eaux et celles des puits villageois est la forte prévalence du faciès chloruré-nitraté dans les puits villageois. Elle illustre la protection des forages expérimentaux contre les pollutions auxquelles les puits villageois sont exposés. L'autre différence entre ces deux types de sites

est la prépondérance de Na dans les eaux de forages expérimentaux, plus forte à la station Aval, alors que Ca est dominant dans les puits villageois. Cette prévalence de Na peut trouver son explication dans la nature minéralogique de la zone. En effet, les analyses de roches ont mis en évidence la forte présence de minéraux primaires très riches en Na dont les plagioclases sodiques, la magnésioriebeckite et des argiles de néoformation notamment la montmorillonite. Au contraire des nappes d'altérite échantillonnées dans les forages expérimentaux, nous ne disposons pas d'analyses de roches pour les nappes d'altérite des puits villageois. Nous pouvons penser à une pollution due à la minéralisation de la matière organique (induisant de forts taux de calcium dans le milieu). Cette hypothèse semble cependant peu probable car Ca demeure également l'élément dominant dans les nappes de socle sous-jacentes des forages villageois, relativement mieux protégés. L'explication devra donc être reliée à la nature pétrographique du site.

Dans les altérites, une forte variation temporelle des concentrations est mise en évidence à 2 m tandis qu'une relative constance des compositions se dégage à 10 m et une bonne homogénéité des faciès subsiste à 20 m. Ce résultat est cohérent avec la très faible fluctuation des compositions chimiques observées précédemment dans les forages d'hydraulique villageoise (réservoirs de socle). Mais il est en contradiction avec la baisse des concentrations constatée pour les réservoirs d'altérite des puits villageois au fur et à mesure de l'installation de la saison humide.

- **Signature des éléments traces**

Les concentrations en éléments traces mesurées à plusieurs périodes sont présentées dans la figure 92 pour la station Amont et en annexe 26 et 27 pour les stations Milieu et Aval.

Al, Sr, Ba et Mn sont une fois de plus les éléments dont les teneurs sont les plus fortes ainsi que le plus souvent Li. Ceci est valable pour les 3 profondeurs, excepté Mn à 10 et 20 m ; vu les fortes concentrations de cet élément qui semblent douteuses, celui-ci n'est pas reporté pour ces deux profondeurs. Du point de vue de la profondeur donc, aucune différence ne se dégage pour les trois stations par rapport à ces éléments.

La différence réside cependant dans les teneurs. Pour les 2 m de profondeur, elles varient de 50 à 150 µg/l (Mn<Al<Ba<Sr) à la station Amont, de 20 à 60 µg/l (Mn<Al<Ba<Sr) pour la station Milieu et de moins de 50 à 200 µg/l (Ba<Sr<Al<Mn) pour la station Aval. Une fois de plus, la station Aval s'individualise par une dominance de Al et Mn. Ceci pourrait expliquer l'existence de réactions d'oxydo-réduction, responsables des dépôts d'oxydes de fer

présents à cette station. Pour les piézomètres de 10 m, les teneurs varient de 200 à 300 µg/l (Al<Ba<Sr) pour la station Amont, 50 à 150 µg/l (Al<Li<Ba<Sr) pour la station Milieu et 40 à 150 µg/l (Al<Ba<Sr<Li) pour la station Aval. Cette disposition traduit un comportement typique de chacune des stations. Pour les piézomètres de 20 m, on a une variation de 40 à 200 µg/l (Al<Li<Ba<Sr), identique pour les stations Amont et Milieu. Pour la station Aval on observe une variation identique aux deux autres stations mais l'ordre d'importance des éléments est Al<Ba<Sr<Li.

Une relative constance temporelle des teneurs spécifiques se dégage à toutes les stations, notamment pour les profondeurs de 10 et 20 m.

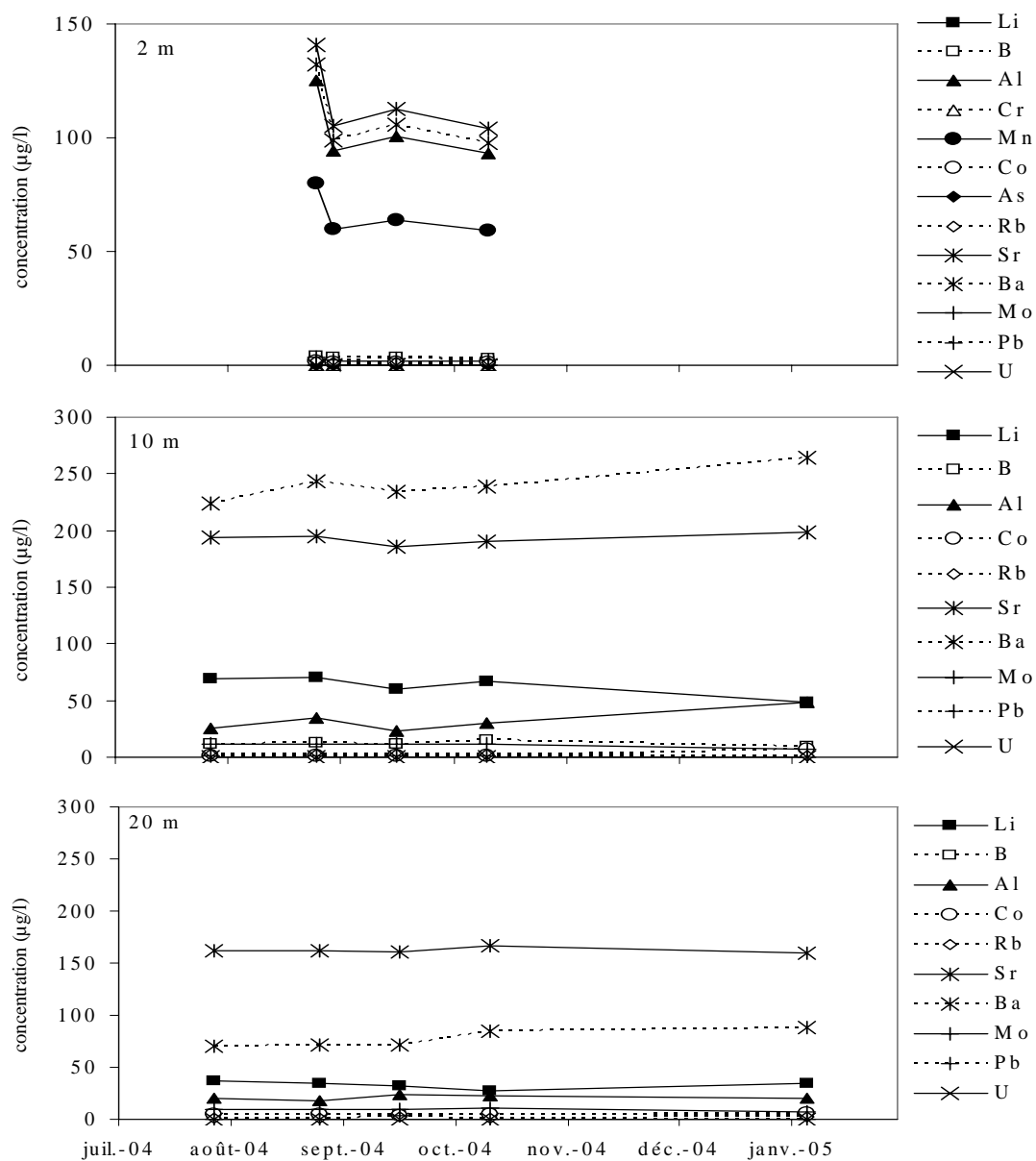


Figure 92 : Concentrations en éléments traces à la station Amont à 2, 10 et 20 m.

▪ Conclusion

À l'échelle du bassin, les eaux souterraines sont dans l'ensemble à tendance acide ($5 < \text{pH} < 7$), avec une température ($27\text{-}28^\circ\text{C}$) logiquement proche de la température moyenne interannuelle de l'atmosphère (station de Djougou : $26,4^\circ\text{C}$). La conductivité électrique des réservoirs souterrains est caractéristique d'une faible minéralisation du fait de la nature silicatée des formations lithologiques traversées. La nappe phréatique des altérites montre une moyenne de l'ordre de $155 \pm 70 \mu\text{S}/\text{cm}$ et plus en profondeur, les eaux des forages (réservoir de socle) montrent des valeurs moyennes plus élevées, de l'ordre de $288 \pm 80 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cette minéralisation, observée en 2003, subit une variabilité saisonnière symptomatique d'une dilution du fait des précipitations. Cependant, cette dilution peut être considérée comme modérée au regard de l'importance des précipitations en 2003. Outre la nette prédominance du silicium, le faciès chimique bicarbonaté calco-magnésien commande largement la signature chimique des eaux souterraines (altérites et socle) en dehors de quelques sites probablement sous forte influence de pollution. La signature chimique des eaux est également dominée par Al, Mn, Sr et Ba, indépendamment de la profondeur. À long terme (cf. forage ancien), on retient une quasi constance de la signature chimique.

À l'échelle du versant, les eaux présentent des températures et des pH similaires à ceux de l'ensemble du bassin. Seule la station Aval présente une acidité particulièrement forte du fait probablement de réactions d'oxydo-réduction plus importantes ou des activités biogéniques prépondérantes dues à la présence de forêt galerie au bas du versant. Les eaux sont faiblement minéralisées dans les horizons de 2 m (30 à $130 \mu\text{S}/\text{cm}$) avec de très fortes variabilités temporelles du fait d'une grande sensibilité aux précipitations. Les horizons de 10 et 20 m ne présentent pas de différences majeures. Les valeurs de C.E. sont comparables ($100 < \text{C.E.} < 300$) à celles des altérites du groupe A de l'ensemble du bassin. Mais on retient une variabilité spatiale non négligeable qui traduit des ruptures hydrauliques probables en accord avec les observations géophysiques. Du point de vue temporel, les plus fortes variations sont observées à la station Aval confirmant ainsi la particularité du site. La signature chimique des eaux, très variable pour les 2 m avec une tendance nettement bicarbonatée sodi-potassique à l'Aval, est bicarbonatée calco-magnésienne à l'Amont et Milieu et bicarbonatée sodi-potassique à l'Aval pour les 10 m. À 20 m toutes les stations présentent un faciès bicarbonaté calco-magnésien. Les éléments traces dominants sont l'aluminium, le strontium, le baryum pour toutes les stations et pour toutes les profondeurs.

IV.2.3.6- Caractérisation des écoulements de surface

Les rivières, exhaures naturelles des différents réservoirs hydriques, jouent un rôle essentiel dans l'équilibre physico-chimique du bassin versant (Braun *et al.*, 2002). À un instant donné, les eaux recueillies à l'exutoire du bassin versant proviennent de plusieurs sources. Elles sont attribuées à la vidange de réservoirs spécifiques, situés à différentes profondeurs, de la surface au plus profond (Boeglin et Tardy, 1997). Ces écoulements peuvent être regroupés en deux catégories : le ruissellement rapide et les flux lents d'origine souterraine (fig. 93). Ces flux souterrains peuvent être également scindés en plusieurs composantes, mais deux termes, l'écoulement hypodermique et l'écoulement souterrain profond sont le plus souvent considérés.

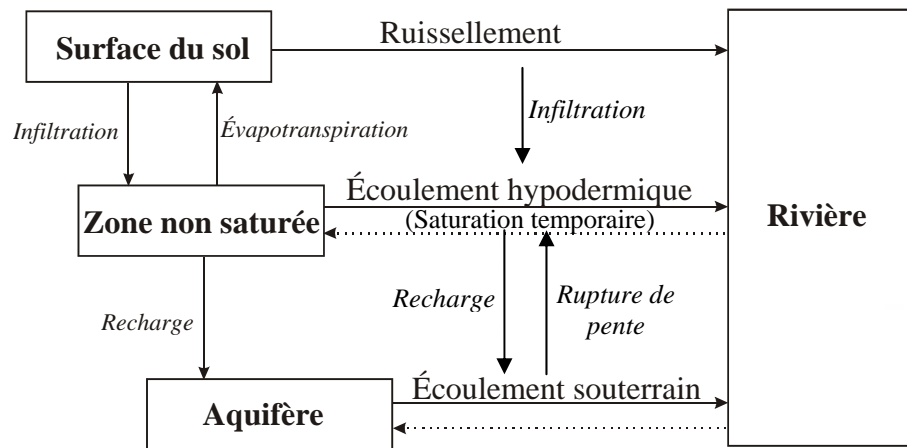


Figure 93 : Schéma conceptuel des composantes théoriques des eaux de rivière.

La variabilité hydrogéochimique des écoulements est fortement contrôlée par la lithologie (Sobieraj *et al.*, 2002). En milieu tropical comme le nôtre, notamment au Cameroun, la composition chimique de 20 rivières du bassin de Nyong (27800 km²), échantillonnées sur une période de deux ans, présente des concentrations relativement faibles en cations (Na, Mg, K et Ca) mais plus importantes en valeur relative en éléments traces (Al, Fe, Th, Zr, Y, REE) et silicium du fait de la nature cristalline et silicatée du substratum (Viers *et al.*, 2000). L'influence de la lithologie sur la chimie des eaux a également été mise en évidence dans la haute vallée du fleuve Niger au Mali (Picouet *et al.*, 2002). Les eaux paraissent faiblement minéralisées du fait de la prédominance des roches silicatées et les teneurs en Ca, Na, Sr, K, Ba, Rb et U, très faibles dans les matières en suspension, sont les plus importantes, du fait de leur forte mobilité chimique lors des processus d'altération.

La variabilité hydrogéochimique des écoulements est également liée au débit des cours d'eau (Caissie *et al.*, 1996). Le ruissellement rapide est plus important en période de crue. Cette composante se produit à la surface du sol ou dans l'horizon A, très altéré et relativement pauvre en cations et en silice (sauf le quartz qui est faiblement soluble (Tardy *et al.*, 2004). Mais Si, K, Ca, Mg, SO₄ et NO₃ peuvent être utilisés par les plantes (Appelo & Postma, 1999 ; Braun *et al.*, 2002) et donc retenus dans cet horizon. Ils influent ainsi sur la composition chimique du ruissellement rapide et/ou des flux hypodermiques. Au contraire des éléments précédents, Al, Na, Cl et HCO₃ ne sont pas essentiels au développement des végétaux et leur concentration peut croître avec la profondeur. Ils sont tout indiqués pour le traçage des eaux plus profondes. Mais dans le cadre de pollution, notamment par les chlorures, l'utilisation de Cl comme traceur naturel reste problématique. Un autre paramètre, caractéristique des écoulements rapides, est la quantification des matières en suspension (MES) dans les eaux, mais il n'a pas pu être mesuré dans notre étude. Cette concentration est supposée maximale en période de crue (écoulement rapide important) et minimale à l'étiage (écoulement lent important ; Tardy *et al.*, 2004).

Du fait donc d'un comportement distinct en période d'étiage ou de crue, les écoulements de surface seront abordés au cas par cas des écoulements de base et des événements de crue. Cette étude portera sur les trois stations hydrométriques : Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.

▪ **Écoulements de base**

Les écoulements de base sont étudiés en parallèle aux mesures hydrométriques réalisées en 2003 et 2004 aux trois stations de jaugeage. Comme ailleurs en zone de socle en milieu tropical, ces débits sont supposés majoritairement d'origine souterraine (Bariac *et al.*, 1995 ; Gremillon *et al.*, 2000 ; Tardy *et al.*, 2004). La connaissance des caractéristiques géochimiques de ces écoulements constitue donc une étude indirecte des flux souterrains contribuant aux écoulements de surface.

Parmi les prélèvements effectués régulièrement aux trois stations (fig. 94), nous avons sélectionné ceux correspondant à des écoulements de base. Le critère de sélection principal est que le prélèvement a été réalisé pendant une période de diminution des débits en dehors des crues. Les dates de prélèvements avec les débits correspondants sont indiquées en annexe 28, 29 et 30.

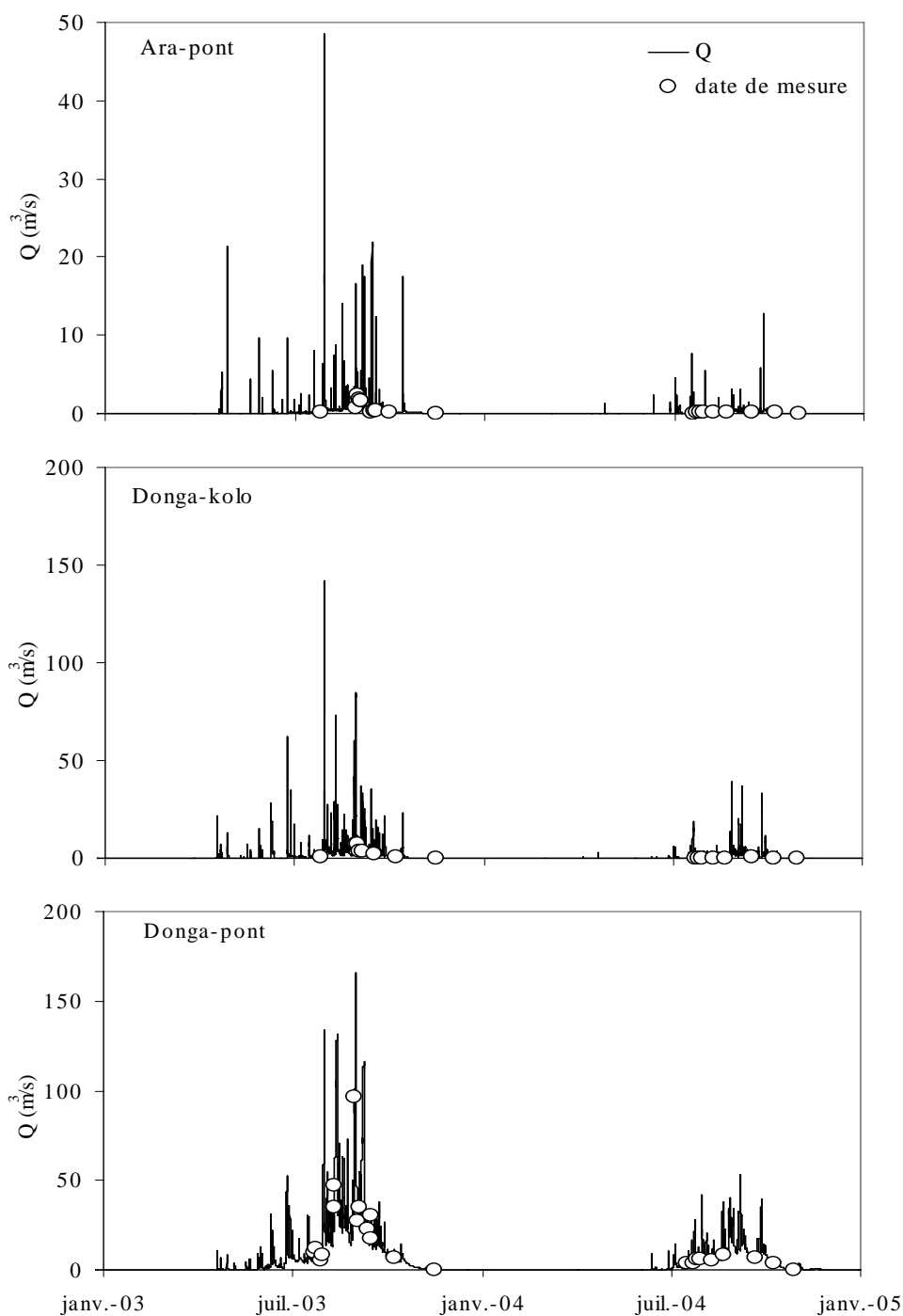


Figure 94 : Dates de mesure physico-chimique hors crue et débits correspondants en 2003 et 2004.

- **Conductivité électrique**

Les figures 95, 96 et 97 présentent la conductivité électrique en fonction du débit. Deux paliers probablement caractéristiques de deux comportements distincts se dégagent pour les trois stations.

À Ara-Pont, pour des débits compris entre 0,2 et 0,7 m³/s, la conductivité électrique reste inférieure à 35 µS/cm et relativement constante (palier 1, fig. 95). Mais pour des débits inférieurs à 0,2 m³/s, la C.E. marque une hausse jusqu'à 45 µS/cm (palier 2).

Pour Donga-Kolo, la conductivité électrique reste autour de 50 µS/cm pour des débits compris entre 1 et 4 m³/s (palier 1, fig. 96). Ce schéma est identique à celui observé à Ara-Pont mais ici le débit et la C.E. sont plus importants. En dessous de 1 m³/s (palier 2) généralement en fin de saison humide, la C.E. croît jusqu'à environ 70 µS/cm (16/11/2003 : 67 µS/cm ; 29/10/2004 : 62 µS/cm).

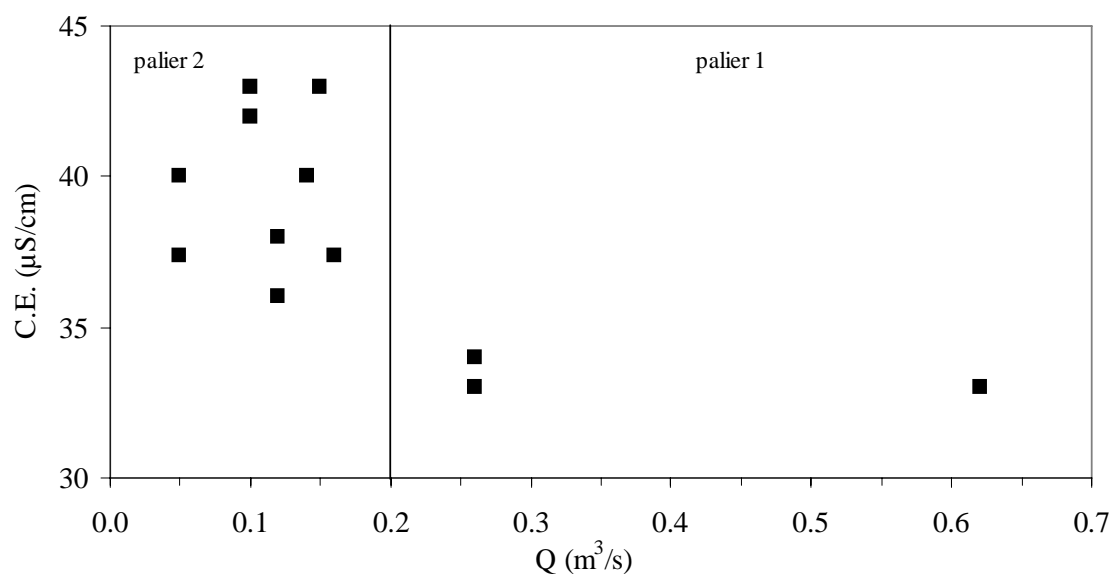


Figure 95 : C.E. en fonction du débit de base à Ara-Pont.

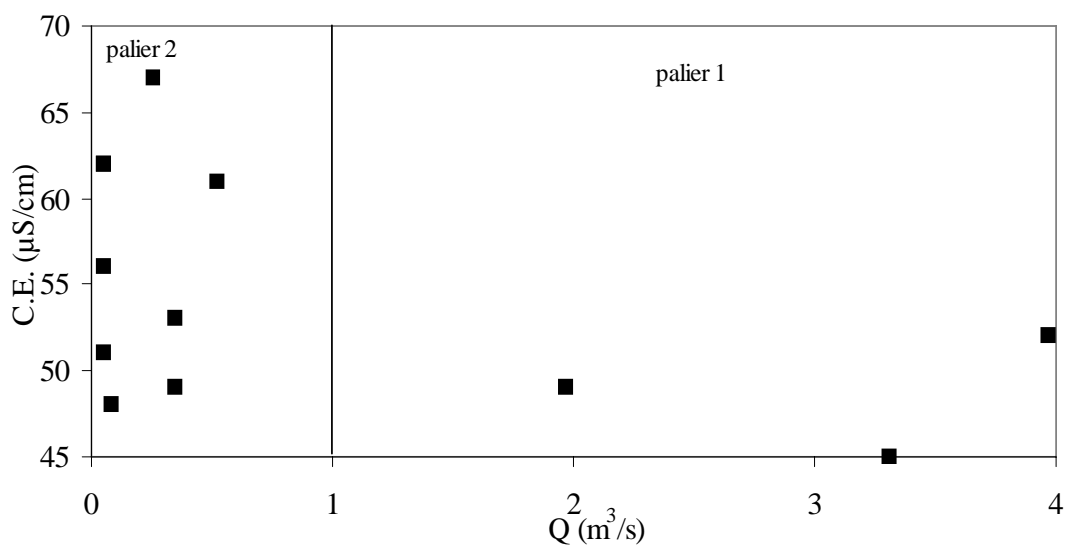


Figure 96 : C.E. en fonction du débit de base à Donga-Kolo.

La répartition de la conductivité en fonction des débits est du même type pour Donga-Pont (fig. 97). Pour des débits inférieurs à 10 m³/s, les C.E. sont proches de 100 µS/cm, avoisinant celles mesurées en certains points dans les réservoirs d'altérite. Ces plus fortes valeurs sont également mesurées à l'étiage, en fin de saison (16/11/2003 : 106 µS/cm ; 27/10/2004 : 102 µS/cm) tout comme à Donga-Kolo.

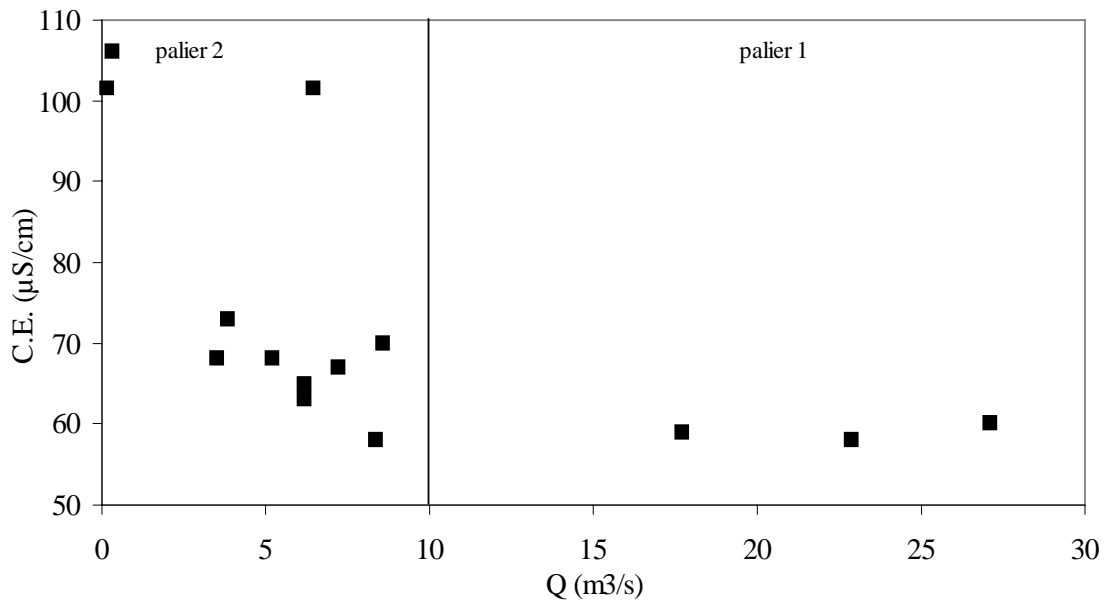


Figure 97 : C.E. en fonction du débit de base à Donga-Pont.

Outre les deux paliers observés à chacune des stations, une augmentation nette de la C.E. est observée d'amont en aval du bassin. Elle pourrait être, soit le fait d'une évaporation de l'eau au cours de son transit, soit le fait d'un apport souterrain de plus en plus important. Par ailleurs, toutes les valeurs de C.E. sont, paradoxalement et de façon flagrante, distinctes de celles mesurées dans la nappe phréatique profonde d'altérite (puits villageois) ou de socle (forages villageois). Elles se rapprochent cependant davantage de celles des eaux superficielles prélevées à moins de 2 m de profondeur.

- **Signature des ions majeurs**

Toutes les eaux de surface échantillonnées n'ont pas été analysées. Mais l'ensemble des analyses chimiques disponibles nous semble suffisant pour décrire le comportement des éléments majeurs en relation avec les écoulements de base.

La quasi totalité des analyses se situe logiquement dans le domaine du faciès bicarbonaté calco-magnésien comme les eaux souterraines (fig. 98). Cette position traduit l'homogénéité des processus physico-chimiques au niveau des différents systèmes

hydrologiques du bassin. Dans le détail, les eaux de la station limnimétrique d'Ara-Pont montrent un faciès davantage sodi-potassique (qui ne remet pas en cause la signature dominante du faciès bicarbonaté calco-magnésien) que celles de Donga-Kolo et Donga-Pont. Ceci semble donc cohérent avec la tendance sodi-potassique des forages expérimentaux, situés sur le petit bassin versant d'Ara.

L'ordre d'importance des teneurs des éléments ($K < Na < Mg < Ca < Si$ pour les cations et $SO_4 < NO_3 < Cl < HCO_3$ pour les anions) observé aux trois stations est identique à celui des eaux souterraines mesurées dans les ouvrages villageois. Les écoulements de base sont donc de faciès chimique similaire à celui dominant dans les eaux souterraines.

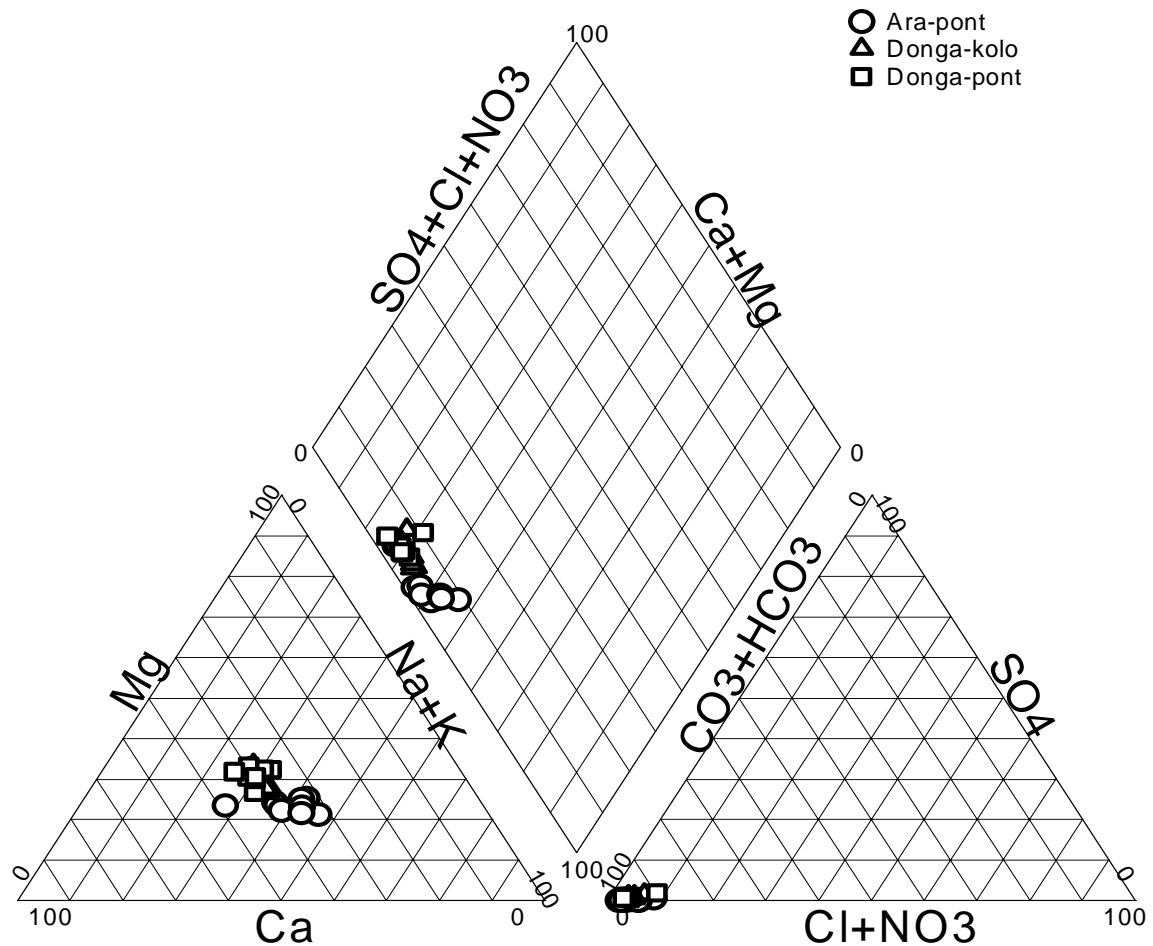


Figure 98 : Diagramme de Piper pour les écoulements de base.

Le rapport entre les différents éléments chimiques dissous et le débit peut donner des indications sur l'origine de l'augmentation de C.E. d'amont vers l'aval (évaporation ou

apport souterrain ?). Contrairement à la C.E., l'évolution des teneurs en Si ne permet pas d'observer clairement les deux paliers du fait du faible nombre de points (fig. 99).

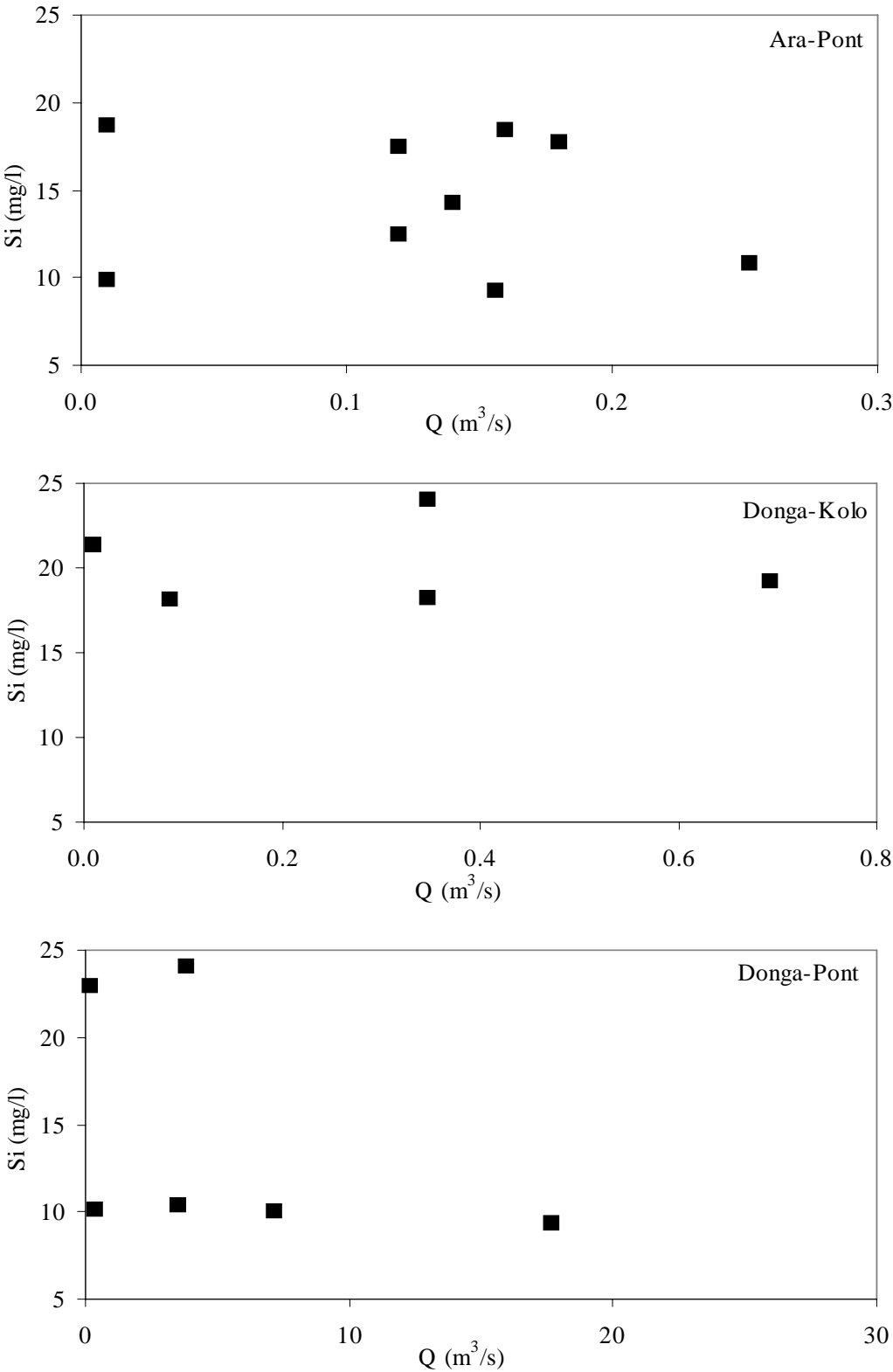


Figure 99 : Teneur en Si en fonction du débit des écoulements de base à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.

La concentration en Ca, Mg et Na augmentent au fur et à mesure que le débit baisse, après une constance moins visible (figure 100), en accord avec la C.E.. Cette augmentation est plus accentuée en fin de saison humide. Mais la station d'Ara-Pont, où les variations des teneurs sont plus faibles, semble faire exception à cette évolution. La contribution du potassium à la minéralisation demeure plus faible et semble indépendante de l'hydrogramme. Toutes ces observations expliquent la hausse de la minéralisation mais ne traduisent en rien l'origine des eaux. Pour les anions (annexe 31), seuls HCO_3 et Cl , semblent adopter une évolution en fonction du débit, similaire aux cations. NO_3 et SO_4 présentent des teneurs plus faibles avec de très faibles variations. Tout comme la conductivité électrique, les teneurs se rapprochent seulement de celles des eaux de subsurface.

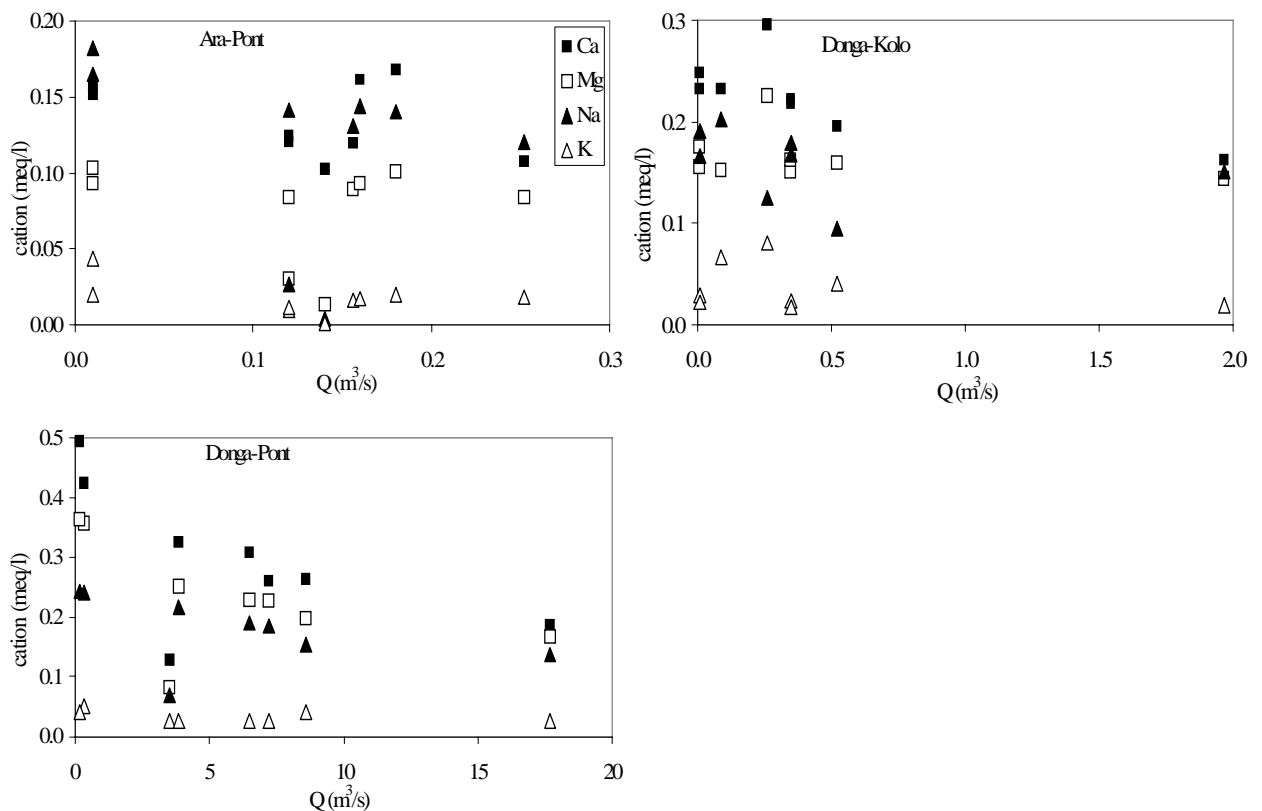


Figure 100 : Teneurs des cations dans les débits de base à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.

La hausse des concentrations au fur et à mesure que le débit baisse pourrait être attribuée à une contribution plus importante des flux souterrains (Sklash et Farvolden, 1979). Ce phénomène a déjà été mis en évidence dans le cadre d'autres études (Walling et Foster, 1975 ; Caissie *et al*, 1996), mais certains processus physiques, dont l'évaporation pourraient également affecter les compositions chimiques et accroître les teneurs. Si tel est le cas, la

minéralisation peut augmenter, mais les rapports ioniques restent constants jusqu'au moins à la précipitation biogéochimique des premiers minéraux. Selon la figure 100 ci-dessus, l'écart entre les teneurs ioniques varie énormément. Ceci permet donc de rejeter l'hypothèse d'une évaporation au profit d'un apport souterrain responsable de la hausse des teneurs. Ceci pourra être conforté ultérieurement par l'analyse des isotopes stables (chapitre IV.3).

- Signature des éléments traces

Le nombre d'échantillons analysés pour les éléments traces est très faible par rapport à celui des éléments majeurs. Ceci limite l'interprétation à une simple observation des teneurs moyennes à chacune des 3 stations. Les débits pour ces échantillons sont compris entre 0,01 et 0,18 m³/s à Ara-Pont, 0,09 et 0,26 m³/s et 3,50 à 7,20 m³/s.

Les éléments Al, Mn, Sr et Ba présentent les plus fortes concentrations (fig. 101). Ceci indique que du point de vue qualitatif, ces eaux ne sont pas distinctes des autres réservoirs déjà étudiés. Mais quantitativement, la gamme de variation pour les écoulements de base est comparable à celle des eaux d'altérite prélevées à 2 m de profondeur (0,02 à 60 µg/l) au site expérimental uniquement. Les teneurs, comparables à Ara-Pont et Donga-Kolo, sont plus importantes à Donga-Pont, mais toujours inférieures à celles de la nappe d'altérite profonde. Pour les autres éléments, les compositions sont identiques ou très proches pour toutes les stations. Seuls les éléments cités, ayant les plus fortes teneurs présentent des écarts importants traduisant un enrichissement d'amont en aval du bassin.

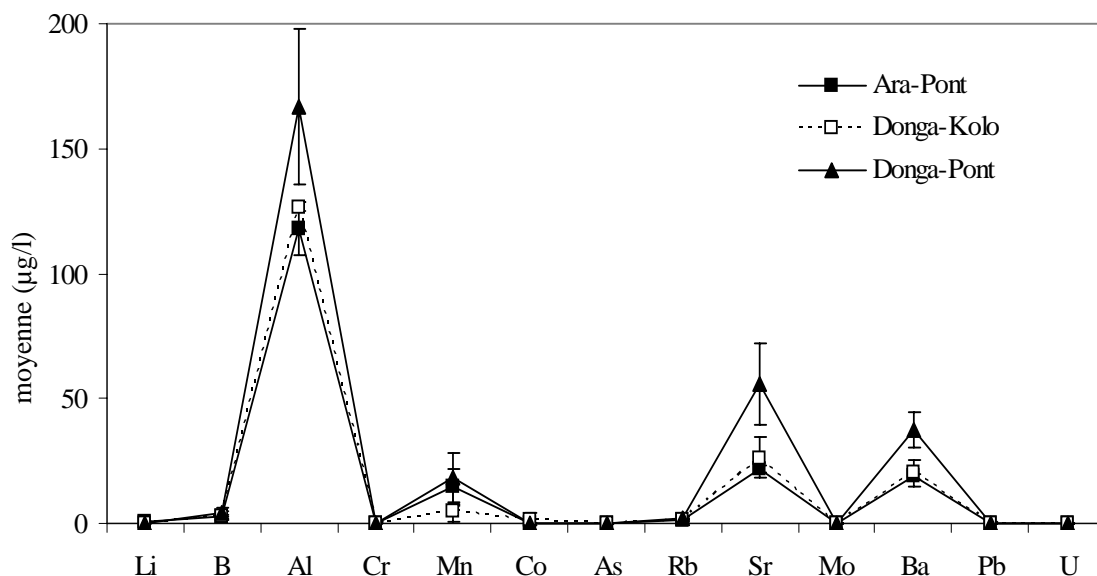


Figure 101 : Composition moyenne en éléments traces dans les écoulements de base.

▪ Évènement de crue

Contrairement aux débits de base dont l'origine est supposée exclusivement souterraine, les crues sont formées d'eaux d'origines diverses. Cette spécificité des crues implique une approche différente. Tout comme pour l'écoulement de base, les évènements de crue sont suivis aux trois stations limnimétriques, en 2003 uniquement. Au total, trois crues ont été suivies : crue 1, crue 2 et crue 3. Les numéros 1, 2 et 3 vont donc servir par la suite à les identifier. Pour la crue 1, seules les stations d'Ara-Pont et Donga-Pont ont été suivies. La crue 2 a été échantillonnée uniquement à Donga-Pont et toutes les trois stations ont été mesurées pour la crue 3. Les caractéristiques des trois crues (lame précipitée sur Ara-Pont, durée et lame écoulée) correspondant à chacune des trois stations limnimétriques sont indiquées en annexe 32.

La position de chacune des trois crues en fonction de la piézométrie peut être appréciée à travers la figure 102. La crue 1 est survenue au milieu de la hausse piézométrique. Avant l'évènement, l'écoulement aurait démarré, suite à des averses plus ou moins importantes, susceptibles de provoquer une hausse piézométrique. La crue 2 est enregistrée au cœur de la saison des pluies qui correspond au début du maximum piézométrique. Pendant cette période le débit des rivières, en position haute, ne s'annule pas (cf. chapitre III). Ceci pourrait traduire un soutien important des eaux souterraines à l'écoulement pendant cette période. La crue 3 a eu lieu à l'amorce de la décroissance piézométrique. La contribution des réservoirs souterrains, du fait du retour progressif au gradient hydraulique d'avant la saison humide, pourrait y être de plus en plus faible.

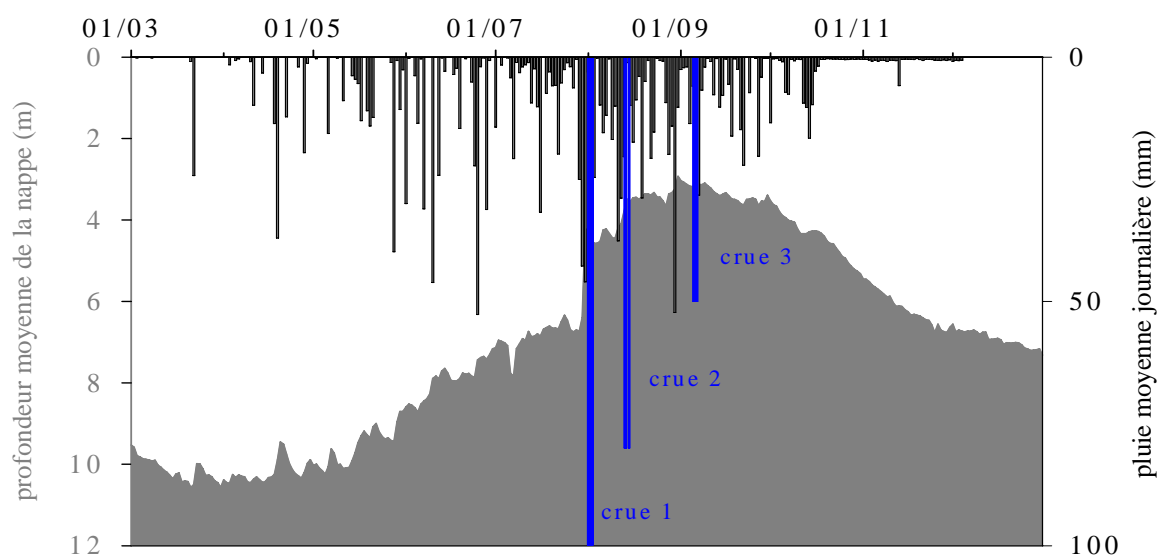


Figure 102 : Positionnement des crues suivies aux trois stations limnimétriques en 2003 par rapport à la pluviométrie et la piézométrie moyennes sur l'ensemble du bassin.

- **T°, pH et O₂**

Les températures ponctuelles mesurées durant les crues varient généralement de 23,5 à 26,5°C pour toutes les stations. Cette gamme est identique à celle des pluies et des eaux souterraines. Mais les fluctuations paraissent très complexes et non structurées (fig. 103). Ceci est le fait du dispositif de mesure basé sur un prélèvement au seau lancé depuis le pont dans la rivière.

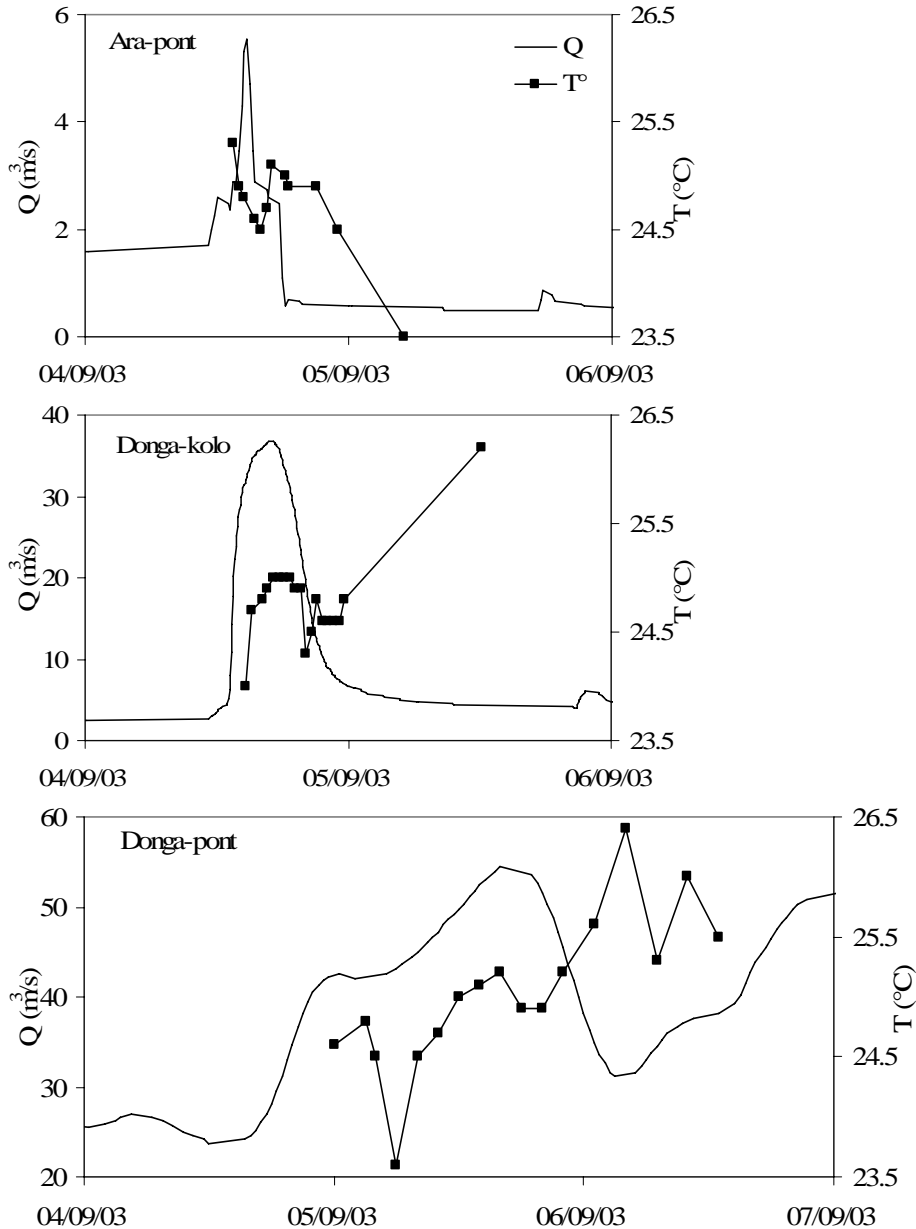


Figure 103 : Évolution de la température mesurée manuellement lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).

Mieux que les mesures ponctuelles effectuées manuellement, on dispose à Donga-Kolo, d'un suivi automatique de la température via les conductimètres HYDREKA décrits précédemment (fig. 104). Avant l'évènement, la température était de 25,5°C. Une chute de 3°C se produit en début de crue. Ceci pourrait être le fait des précipitations ayant des températures plus faibles. Le minimum (23 °C) s'observe une heure avant le pic de crue. Une hausse progressive des valeurs s'en suit jusqu'à un retour à la température d'avant l'évènement, témoignant de l'évacuation presque totale du ruissellement rapide. Ceci pourrait être également associé à une arrivée de flux souterrains ayant des températures plus élevées. Théoriquement, les eaux souterraines présentent des températures plus élevées avec la profondeur. Ceci peut être un indicateur de l'origine des composantes d'une crue. Mais les observations antérieures ont montré qu'il n'existe pas de différence importante entre les températures des différents horizons souterrains d'une part et entre les eaux souterraines et les précipitations d'autre part.

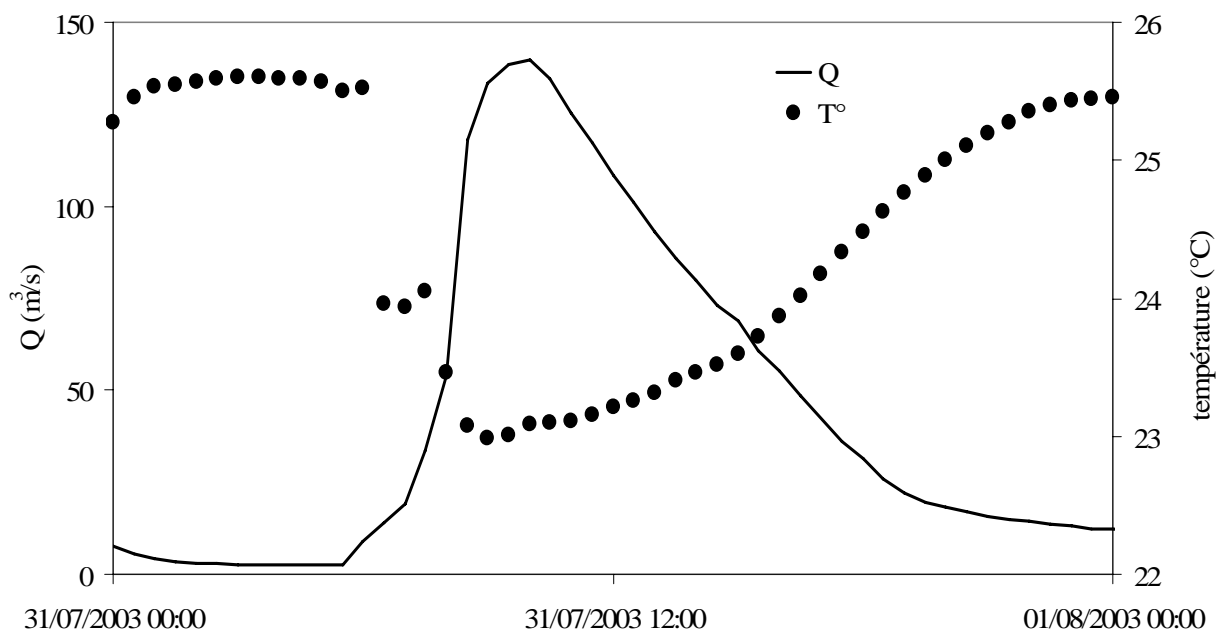


Figure 104 : Température automatique (mesure HYDREKA- Greenspan) lors de la crue 1 à la station limnimétrique de Donga-Kolo.

De façon générale, le pH augmente lors de la crue et baisse à la décrue. Mais tout comme la température, les fluctuations apparaissent très difficiles à comprendre avec de très fortes variations caractérisées par des pics négatifs de pH (fig. 105) expliqués par certains auteurs comme étant une intrusion brusque et brève des eaux souterraines (Walling et Foster, 1975 ; Sklash et Farvoden, 1979 ; Caissie *et al.*, 1996).

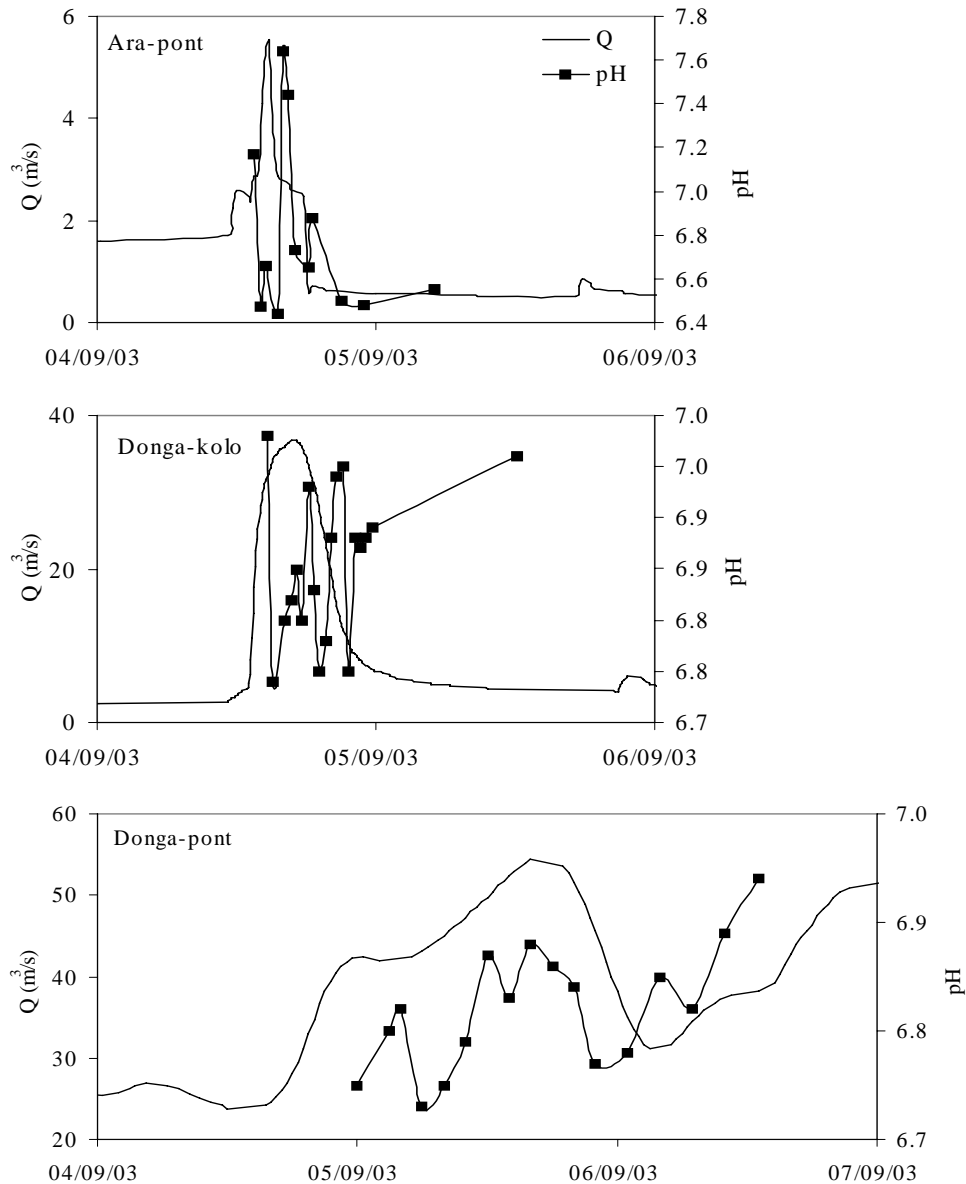


Figure 105 : Évolution du pH lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).

Le taux en oxygène dissous est généralement plus fort dans le ruissellement de surface que dans les eaux souterraines. Dans le détail, on observe une évolution similaire entre l'hydrogramme de crue et les teneurs en oxygène dissous, mais avec de nombreux pics inexplicables (fig. 106). Cette évolution concomitante paraît logique si on considère qu'en début de crue la part du ruissellement est plus importante et qu'en décrue c'est le souterrain qui devient prépondérant. Contrairement donc aux deux premiers paramètres, O₂ semble mieux traduire les composantes de l'écoulement.

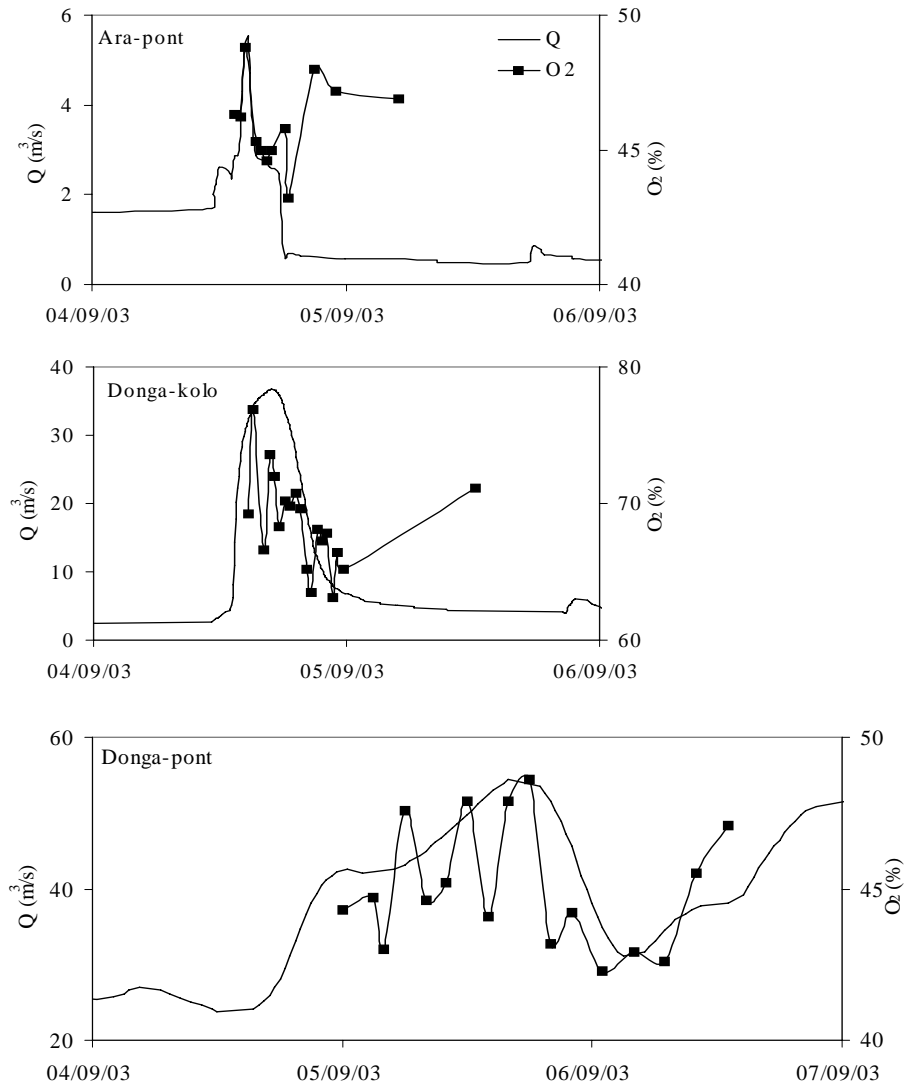


Figure 106 : Évolution de l'O₂ dissous lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).

- Conductivité électrique

La conductivité électrique des eaux, par son caractère intégrateur, apparaît comme un paramètre important dans le traçage des compartiments de l'écoulement de surface. Une nette différenciation des conductivités électriques entre les composantes (précipitations, eaux de subsurface et nappes profondes) supposées contribuer aux débits des rivières a été précédemment mis en évidence. La mise en charge du bief s'accompagne d'une chute brutale de la conductivité (fig. 107). Cette baisse est plus rapide à Ara-Pont et fait penser à une inversion probable du gradient hydraulique tendant à freiner les flux d'eaux souterraines (Caissie *et al.*, 1996) et à un fonctionnement distinct entre les compartiments du bassin mis également en évidence avec les écoulements de base. La baisse de la conductivité se poursuit

jusqu'à une valeur proche de celle des eaux de pluie témoignant d'un effet de dilution. Son minimum étant atteint, généralement au pic de crue à Ara-Pont et Donga-Kolo et quelques instants après le pic de crue à Donga-Pont, la conductivité amorce un recouvrement progressif des valeurs initiales. Ceci est la preuve que l'origine des composantes de la crue change en fonction de la forme de l'hydrogramme. Cependant, les valeurs de conductivité d'avant et de fin de crue restent toujours inférieures à celles enregistrées dans les nappes de socle et d'altérites à plus de 10 m de profondeur. Elles sont plus proches de celles des nappes temporaires d'altérite à 2 m de profondeur. Ceci conforte l'hypothèse d'une très faible contribution des réservoirs profonds à l'écoulement, même en période de crue, au profit des flux de subsurface.

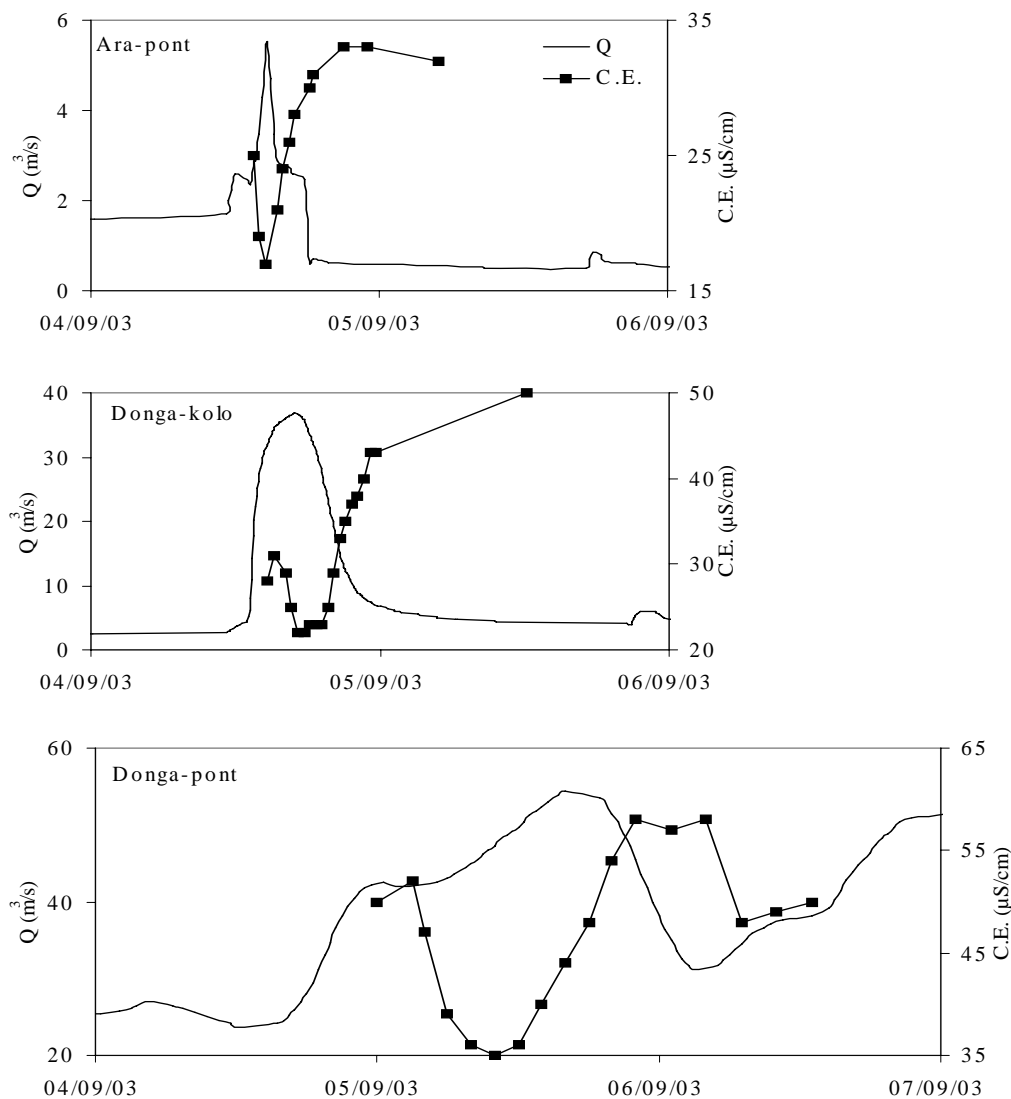


Figure 107 : Évolution de la C.E. lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).

Tout comme la température, des suivis automatiques et continus de la C.E. sont disponibles (HYDREKA-Greenspan), toujours à la station de Donga-Kolo. La chute de début de crue et le recouvrement progressif après le pic de crue observés précédemment avec les mesures manuelles sont également visibles (fig. 108).

En revanche ce schéma général apparaît très souvent complexifié. Deux phénomènes principaux semblent affecter les chroniques. Le premier est caractéristique d'une évolution simultanée de la C.E. et de l'hydrogramme (fig. 108A). Ce phénomène récurrent, notamment pour les petites crues de l'année 2004, traduirait une arrivée massive de charges solides. Du fait de la faible ampleur de la crue, l'évacuation complète de ces charges se superpose à la fin de l'évènement. Le second traduit une hausse anormale de la C.E. à la fin de la crue (fig. 108B). Les valeurs de fin d'évènement excèdent souvent celles d'avant la crue. Ce phénomène complexe peut traduire probablement un dépôt de matière en suspension sur le capteur.

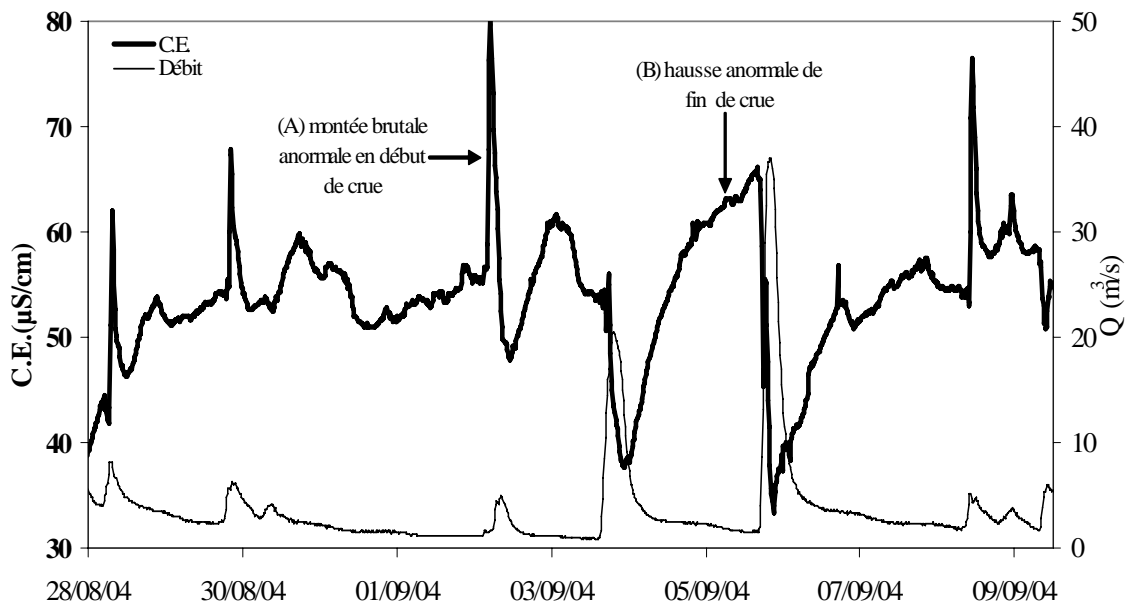


Figure 108 : Exemple (A) d'augmentation brutale de la C.E. en début de crue et (B) de hausse anormale en fin de crue à la station limnimétrique de Donga-Kolo

Parmi les paramètres physico-chimiques précédemment discutés, seule la température présente une évolution similaire à la C.E. (fig. 109). Cette similarité renforce l'idée d'une proportion relativement faible des réservoirs souterrains en début de crue et d'une contribution de plus en plus importante à la fin de la crue.

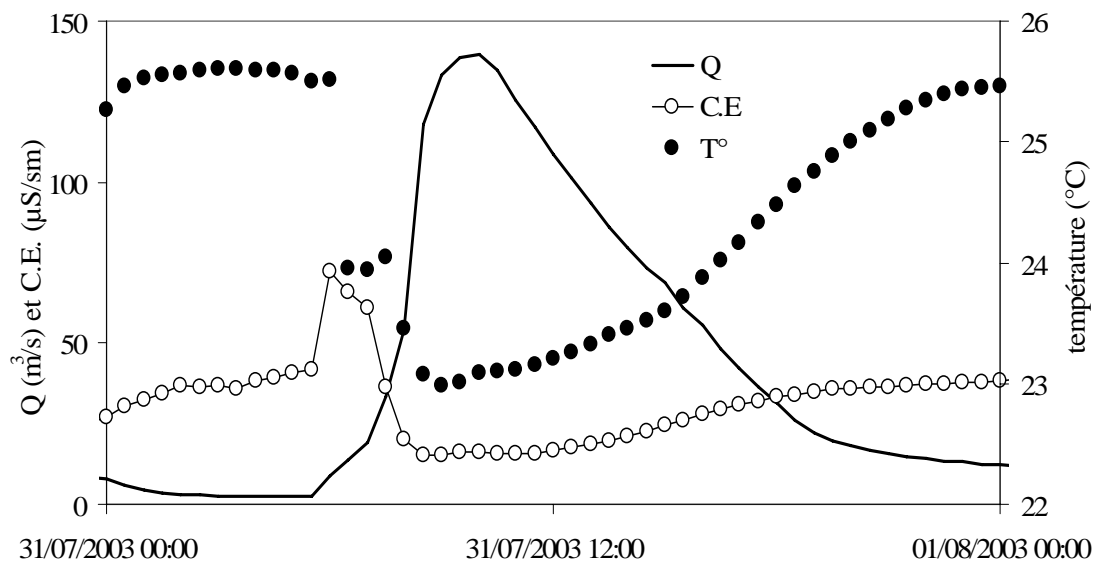


Figure 109 : Évolution simultanée de la C.E. et de la température (HYDREKA-Greenspan) lors de la crue 1 à Donga-Kolo.

- **Signature des éléments majeurs**

Tout comme la C.E. et la température, l'évolution des teneurs en silicium présente deux phases importantes. Une chute en début de crue suivie d'une hausse vers les valeurs d'avant la crue (fig. 110). À titre de précision, le début de l'évènement n'a pu être échantillonné à Ara-Pont.

Tout comme précédemment, l'évolution des éléments majeurs commence par une chute plus ou moins rapide des teneurs (fig. 111, 112 et 113). Cette baisse se poursuit jusqu'à une valeur minimale proche des eaux de pluie confirmant une fois de plus l'existence d'un effet de dilution. Un retour progressif à la valeur initiale d'étiage succède ensuite. Cette fluctuation identique à celle de la conductivité électrique est rigoureusement respectée par Ca, Mg, Na et HCO₃ qui évoluent de façon concomitante. Les teneurs en Cl, NO₃ et SO₄ ainsi que leurs variations sont particulièrement faibles en accord avec ce que l'on observe dans les autres systèmes hydrologiques étudiés précédemment.

Pour les cations, l'ordre d'importance observé pour les eaux souterraines (Ca > Mg > Na > K) est modifié lors de la crue et à toutes les stations. On observe une augmentation de K ou sinon une baisse relative moins importante que pour les autres cations. K dépasse Na lors de la crue. L'ordre (K < Na) redevient comparable à celui des écoulements de base en fin de crue. Il semble que cette particularité de K soit liée à sa très forte implication dans les processus biologiques (Braun *et al.*, 2002). Durant la décrue, toutes les teneurs ont tendance à retrouver leurs valeurs initiales permettant ainsi un retour à l'ordre ionique premier. Ceci

témoigne de la mobilisation de plusieurs sources d'eaux dont la proportion évolue au cours de la crue.

Pour les anions, seul HCO_3 présente des teneurs significatives. Il reste l'ion dominant tout comme pour les eaux souterraines. L'évolution des teneurs en SO_4 , NO_3 et Cl présente des constances caractérisées par de très faibles variations durant les trois crues. Ils font exception à la fluctuation type adoptée par les autres éléments.

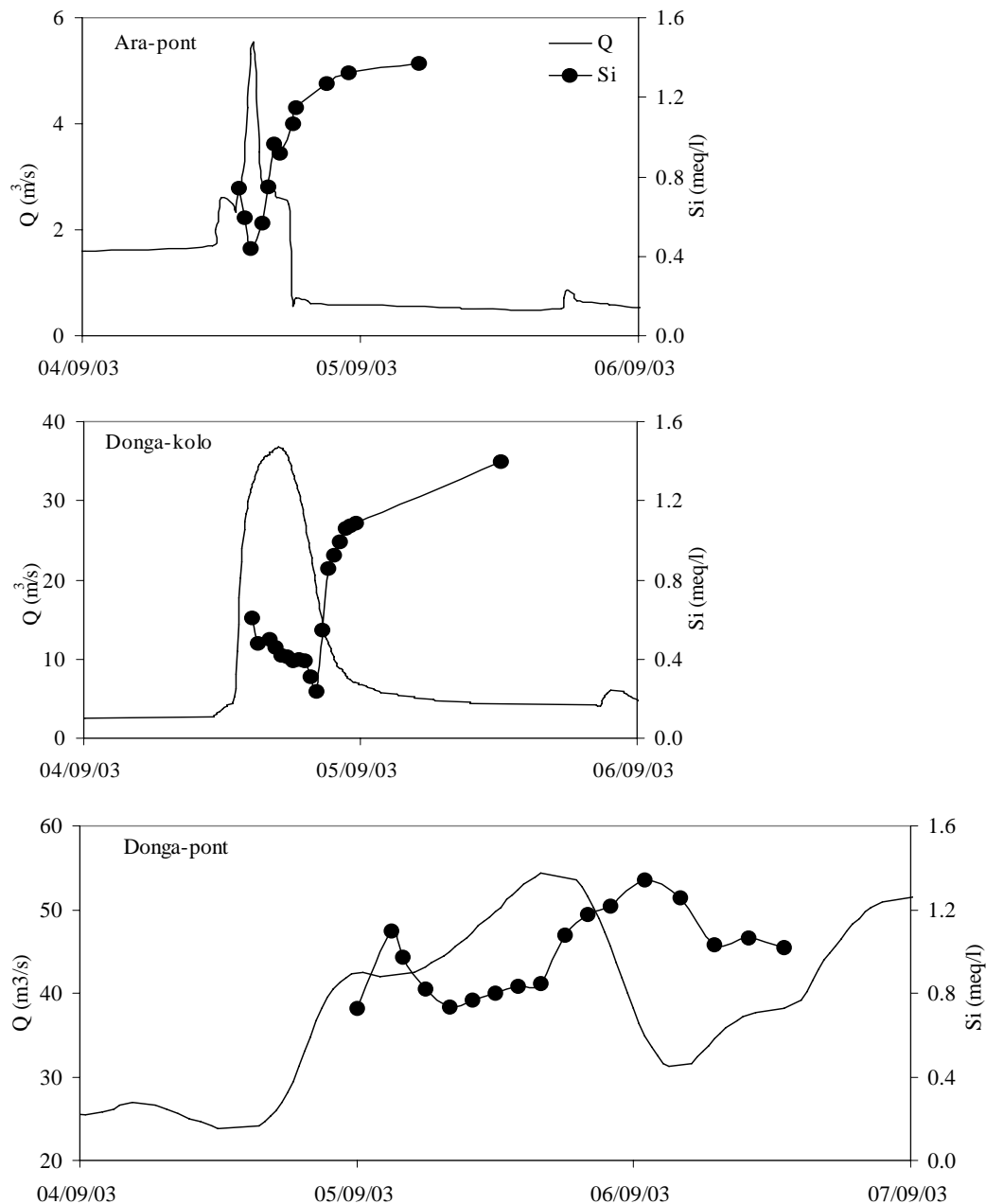


Figure 110 : Variation des teneurs en silicium dans la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).

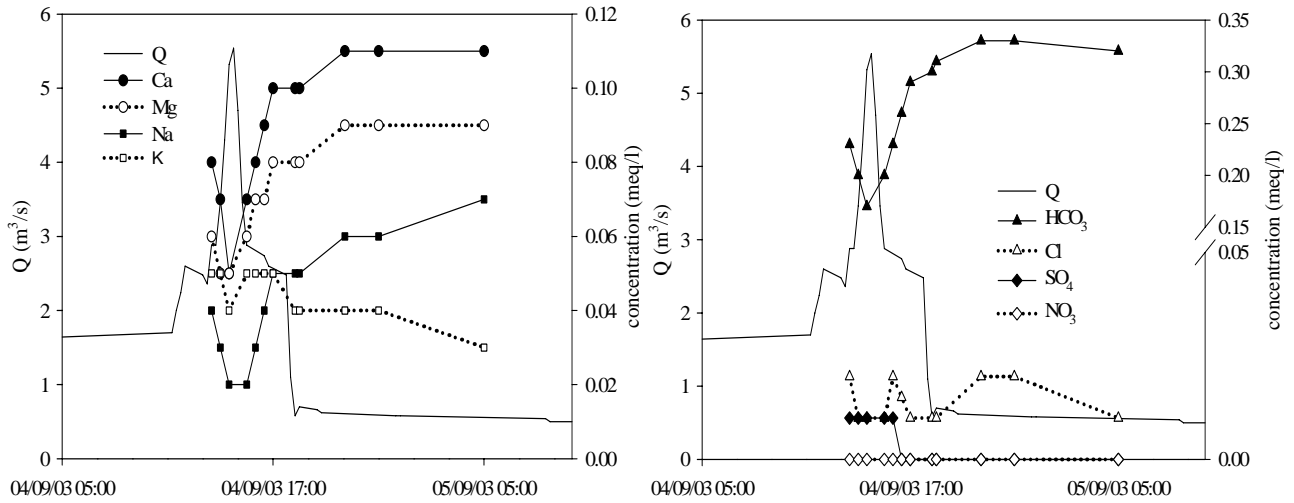


Figure 111 : Variation des teneurs en ions majeurs dans la crue 3 à Ara-Pont.

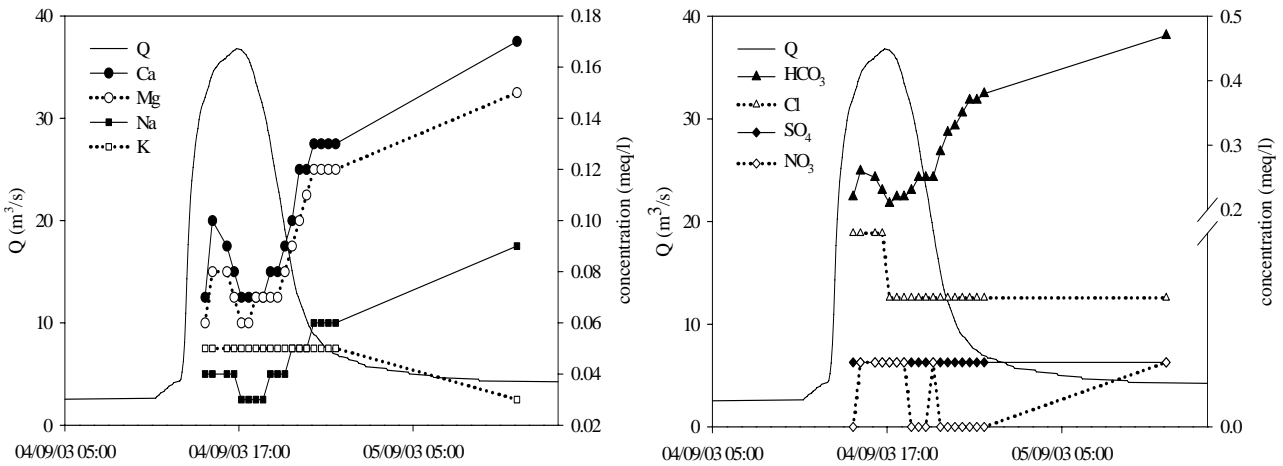


Figure 112 : Variation des teneurs en ions majeurs dans la crue 3 à Donga-Kolo.

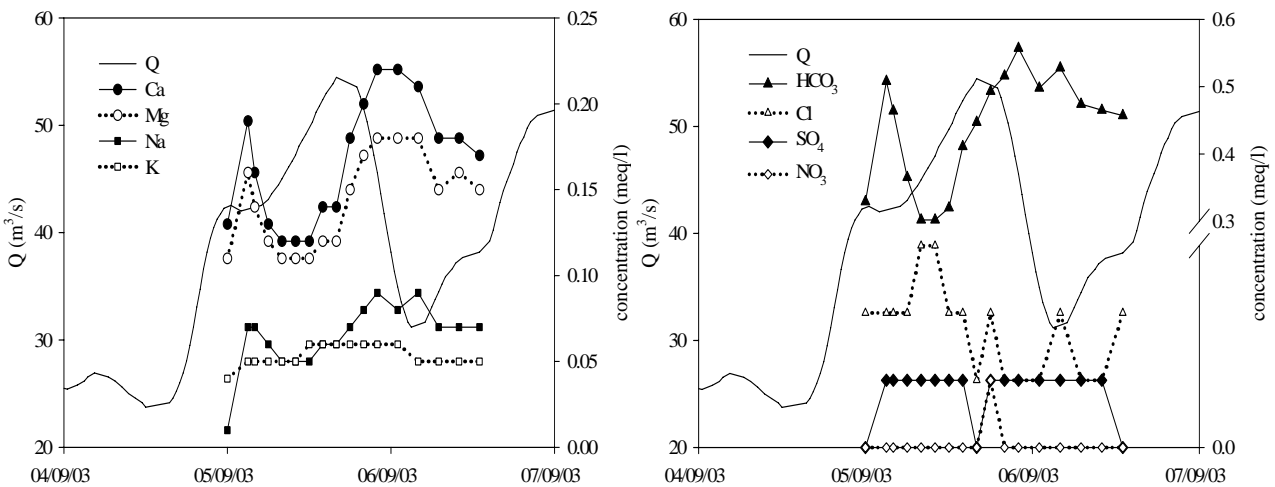


Figure 113 : Variation des teneurs en ions majeurs dans la crue 3 à Donga-pont.

Dans l'ensemble, on observe une fluctuation identique à toutes les stations relativement à certains éléments majeurs (Si, Ca, Mg, Na, HCO₃), c'est-à-dire une chute en début de crue suivie d'une remontée des concentrations. Cette chute peut être attribuée à la fois à une dilution due aux eaux de pluie moins minéralisées et probablement à une inversion du gradient hydraulique à l'interface nappe-rivière, suite à la mise en charge de la rivière. La hausse de fin de crue serait le fait d'une évacuation importante du ruissellement rapide et de la part plus importante des réservoirs de subsurface à l'écoulement. Par ailleurs les teneurs sont d'autant plus élevées qu'on s'éloigne de la tête du bassin, notamment pour les cations qui proviennent essentiellement de l'altération. Cette évolution des compositions chimiques en fonction de la surface du bassin a déjà été mise en évidence pour les débits de base.

En revanche, si le pic de crue correspond au minimum de concentration à Ara-Pont et Donga-Kolo, on observe un léger décalage à Donga-Pont entre le débit maximal et le minimum de concentration ; ce dernier précédant d'environ 15 mn le pic du débit. Appelo et Postma (1999) explique ce fait par un léger écart entre la vitesse de montée des eaux et la vitesse moyenne de l'eau dans le canal (la deuxième quelque peu inférieure à la première). Cette observation met en exergue le fonctionnement distinct des compartiments du bassin.

Si la remontée des teneurs après la chute de début de crue est liée à une contribution de plus en plus importante des eaux souterraines, alors l'écoulement lors des crues proviendrait essentiellement du ruissellement de surface en amont du bassin (surtout sur le bassin d'Ara) tandis qu'en aval, il est de manière prépondérante d'origine souterraine.

- **Signature des éléments traces**

Contrairement aux ions majeurs pour lesquels une fluctuation unique se dégage lors des crues, les éléments traces se caractérisent par des fluctuations variables selon les éléments. Seuls Sr et Ba évoluent de façon similaire à C.E., Si, Ca, Mg, Na et HCO₃. L'exemple de la crue 3 (fig. 114, 115 et 116) montre que, dès le début de la mise en charge des rivières, ces deux éléments enregistrent une chute plus ou moins brutale jusqu'à une valeur minimale. Une augmentation s'en suit immédiatement tendant à revenir aux valeurs initiales. Elle traduit la contribution progressive des réservoirs souterrains.

Par ailleurs, la concentration en Sr demeure toujours supérieure à celle de Ba. Ce schéma diffère totalement de celui observé pour les autres éléments traces. Ils présentent chacun une fluctuation particulière. Certains suivent une décroissance illogique des teneurs du début à la fin de la décrue. D'autres, au contraire, s'enrichissent au cours de la crue. En revanche B et Rb n'évoluent pas de manière similaire à Sr et Ba à Ara-Pont et Donga-Kolo,

au contraire de Donga-Pont. Si le bore est un composant des fertilisants utilisés par les paysans, il est également établi que les argiles d'altération sont riches en Rb. L'augmentation relative de leurs teneurs en même temps que celle des autres produits d'altération confirme logiquement une participation des horizons « sols » peu profonds à l'écoulement. Comme pour les éléments majeurs, le retour aux teneurs initiales débute au pic de crue pour Ara-Pont et Donga-Kolo tandis qu'il a lieu systématiquement pendant la montée des eaux à Donga-Pont.

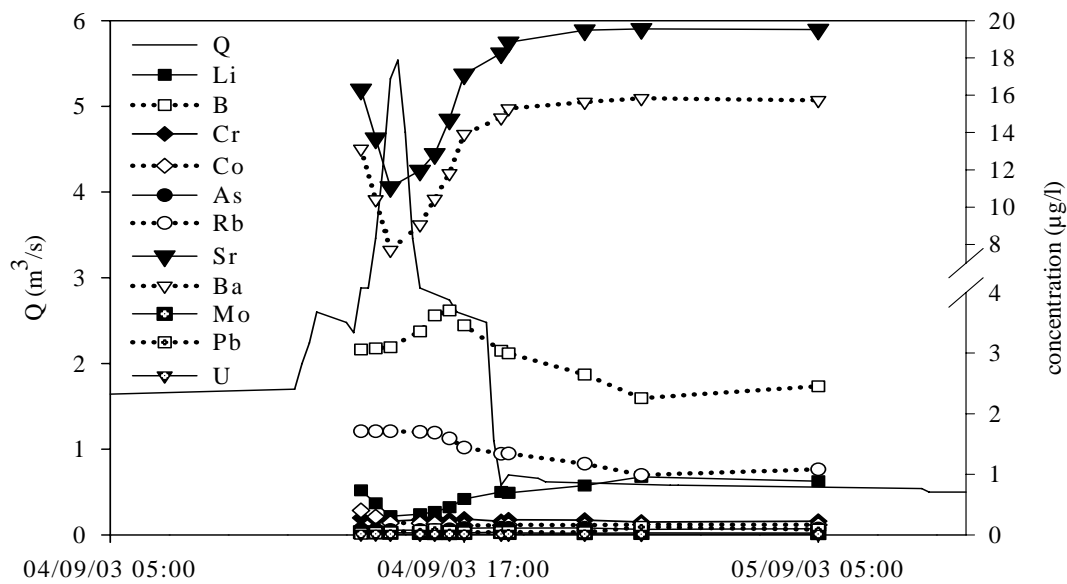


Figure 114 : Variation des teneurs en éléments traces lors de la crue 3 à Ara-Pont.

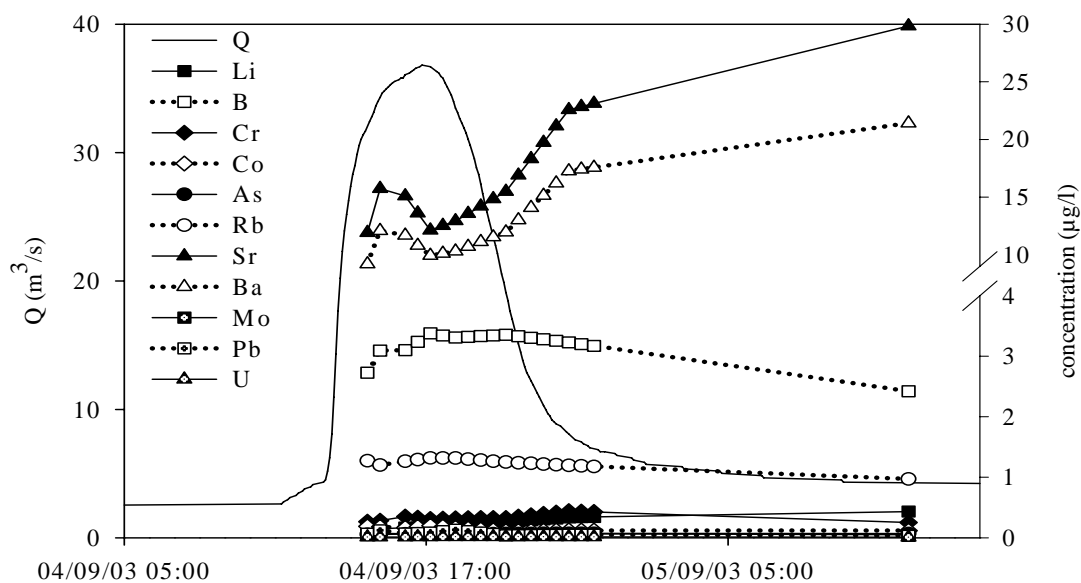


Figure 115 : Variation des teneurs en éléments traces lors de la crue 3 à Donga-Kolo.

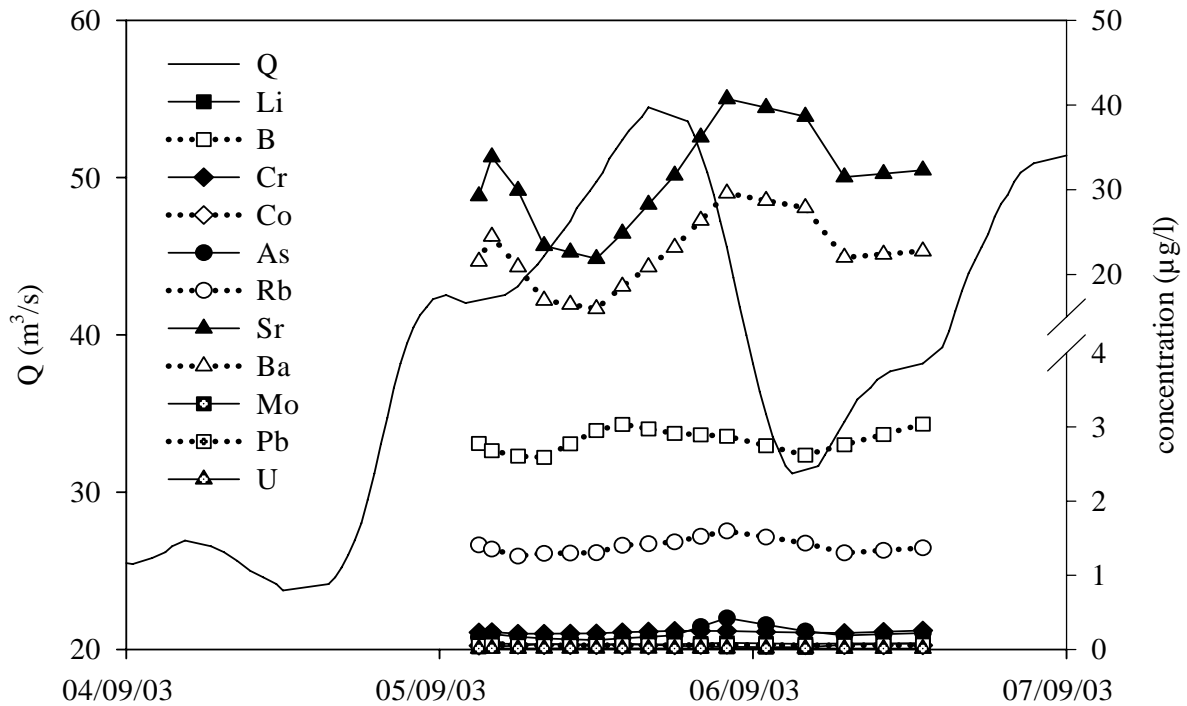


Figure 116 : Variation des teneurs en éléments traces lors de la crue 3 à Donga-Pont.

▪ Conclusion

On retient l'indépendance entre la conductivité électrique des écoulements de base et le débit, hormis pour les débits les plus faibles où la C.E. augmente. Aussi d'amont en aval du bassin, la C.E. augmente t-elle sensiblement. Ceci pourrait traduire un apport de plus en plus important des réservoirs souterrains, encore plus fort en fin de saison humide. La signature des éléments majeurs des débits de base, se rapproche fortement de celles des eaux de subsurface. L'apport de ce réservoir de subsurface semble plus important en période basse (plus forte à l'étiage). Par ailleurs contrairement à la conductivité et aux teneurs en ions majeurs, aucun enrichissement significatif d'amont en aval n'est observé pour les éléments traces, sauf pour Sr et Ba dont les concentrations augmentent seulement à l'exutoire.

En période de crue une fluctuation type, caractérisée par une chute en début de crue suivie d'un retour progressif aux valeurs des écoulements de base (en fin de crue) se dégage, témoignant soit d'une contribution en proportion variable d'une unique source, soit d'une contribution constante de plusieurs sources à l'écoulement total de surface. Cette évolution est rigoureusement respectée par C.E., Ca, Mg, Na, HCO₃, Sr et Ba.

IV.3- Géochimie isotopique

Contrairement à la physico-chimie, les données isotopiques sont peu nombreuses. Les isotopes stables couramment utilisés en hydrogéologie sont l'oxygène-18 ($\delta^{18}\text{O}$) et le deutérium ($\delta^2\text{H}$). Ceux-ci viennent simplement compléter l'approche hydrochimique. Ils sont utilisés comme traceurs aussi bien dans le cadre de l'étude des précipitations que de celles des eaux souterraines et de surface. Plusieurs problématiques répondant à la question du fonctionnement hydrologique des bassins peuvent être abordées à partir des isotopes stables :

- l'origine des eaux étudiées,
- l'effet mémoire des aquifères : temps de résidence et évaporation,
- bilan hydrologique,
- relation entre eaux souterraines et eaux de surface.

À notre connaissance, aucune donnée historique n'est disponible sur la zone. Les seules valeurs de référence portent sur des moyennes annuelles enregistrées dans des précipitations à des stations plus ou moins éloignées de notre zone (Parakou, Savé, Bohicon et Cotonou, tableau 14) dans le cadre du programme EPSAT (Taupin *et al.*, 2000). Ces valeurs moyennées sur une année ne serviront qu'à apprécier les ordres de grandeur du signal d'entrée dans les réservoirs souterrains.

Station	Lat. °N	Long. °E	Alt. (m)	Pluie annuelle (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	dp (‰)	ΔT (K)
Parakou	9,21	2,36	320	1174	-4,1	-31	2	-3,3
Savé	7,59	2,28	198	740	-4,0	-24	9	3,0
Bohicon	7,10	2,04	167	895	-3,2	-20	5	-2,5
Cotonou	6,21	2,23	4	913	-4,5	-38	4	-2,0

Tableau 14 : Teneurs isotopiques annuelles dans les précipitations de 1989 enregistrées à Parakou, Savé, Bohicon et Cotonou au Bénin ; $\delta^{18}\text{O}$ = moyenne en oxygène 18, $\delta^2\text{H}$ moyenne en deutérium, dp = excès en deutérium, ΔT = variation moyenne de la température.

IV.3.1- Échantillonnage et représentativité des données

Le dispositif d'échantillonnage (pluviomètres, puits, forages et rivières) est identique à celui utilisé pour les paramètres physico-chimiques. Les périodes de prélèvement sont également identiques, mais le nombre d'échantillons varie selon le type de réservoir.

La représentativité des prélèvements est confrontée à des difficultés selon la nature du réservoir échantillonné. Pour les eaux souterraines, les forages (mieux protégés) semblent fournir un accès direct à la signature isotopique des eaux tandis qu'avec les puits (largement ouverts à l'atmosphère), le risque de fractionnement isotopique est plus important à l'interface eau-atmosphère. Un puisage intensif a toujours précédé l'échantillonnage afin de réduire au mieux ce biais systématique et permettre un échantillonnage des eaux représentatif de l'aquifère. Pour les eaux de surface, en période pluvieuse, l'humidité relative est plus importante et les risques de fractionnement sont réduits. En revanche, en période d'étiage, l'action combinée du ralentissement des flux et de la baisse de l'humidité relative est susceptible de modifier les rapports isotopiques. Pour les eaux de pluies, l'échantillonnage répondant aux conditions strictes de représentativité nécessite des prélèvements d'eau pendant l'évènement pluvieux. Ce protocole a été difficile à mettre en place pour des raisons logistiques. Mais pour minimiser une évolution post-évènement et obtenir un signal moyen, l'échantillonnage pour la plupart des pluies est réalisé quelques instants (5 à 20 min) après la fin de l'évènement.

IV.3.2- Méthodes et précisions analytiques

Les prélèvements en vue des analyses des isotopes stables de l'eau ont été effectués dans des bouteilles en verre ambré avec bouchon étanche afin d'éviter tout fractionnement isotopique de la molécule d'eau. Les analyses ont été réalisées au laboratoire de Biogéochimie des Milieux Continentaux BIOMCO (INRA INA PG) de Grignon (France). La précision analytique est de 0,2 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et 1 ‰ pour $\delta^2\text{H}$.

Tous les compartiments étudiés pour l'hydrochimie (précipitations, eaux de surface et eaux souterraines), le seront pour les isotopes stables de l'eau.

IV.3.3- Caractérisation des précipitations

Seuls des prélèvements en début (juillet 2003) et en pleine saison humide (septembre 2003) ont été réalisés. Les prélèvements de juillet permettent de quantifier le signal isotopique initial d'entrée dans les systèmes aquifères tandis que ceux de septembre

fournissent le signal d'entrée à peu près au maximum piézométrique. Au total, 10 échantillons ont été prélevés (tableau 15). La plupart d'entre eux sont échantillonnés entre 5 et 20 min après chaque évènement pluvieux. Seulement trois pluies, de septembre, (en gras, tableau 15) ont été échantillonnées près de 12 heures après l'évènement.

À l'échelle de l'évènement, les compositions varient très largement de -5,3 à +1,8 ‰ et -34,0 à +23,6 ‰ pour ^{18}O et ^2H respectivement. Cette grande variabilité des teneurs isotopiques typique des précipitations de l'Afrique intertropicale a déjà été mise en évidence, notamment au Niger (Taupin *et al.*, 1997 ; Taupin *et al.*, 2002).

Pluviomètre	Long. °E	Lat. °N	Date	Hauteur (mm)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Nalohou 2	1,56	9,76	16/02/03	20,5	+1,8	+23,6
Nalohou 2	1,56	9,76	30/07/03	110,9	-0,2	+5,1
Al Hamoud	1,66	9,76	30/07/03	136,7	-2,9	-15,0
Djougou	1,66	9,69	30/07/03	150,9	-2,3	-9,9
Foyo	1,70	9,69	30/07/03	88,5	-3,8	-18,3
Nalohou 2	1,60	9,76	31/07/03	22,5	-5,3	-28,6
Al Hamoud	1,66	9,76	05/09/03	32,0	-5,3	-34,0
Nalohou 2	1,60	9,76	05/09/03	11,7	-0,2	-16,9
Djougou	1,66	9,69	05/09/03	2,1	-0,3	-17,6
Foyo	1,70	9,69	04/09/03	23,0	-2,5	-19,4

Tableau 15 : Teneurs isotopiques événementielles dans les précipitations (en gras : évaporation probable due à une collecte tardive).

De façon générale, les pluies sont d'autant plus appauvries en isotopes lourds qu'elles sont plus importantes (effet de masse). La figure 117 indique les teneurs en oxygène-18 en fonction des hauteurs de pluie de juillet 2003. À l'échelle événementielle, cet effet de masse n'apparaît pas clairement, probablement du fait du faible nombre de points.

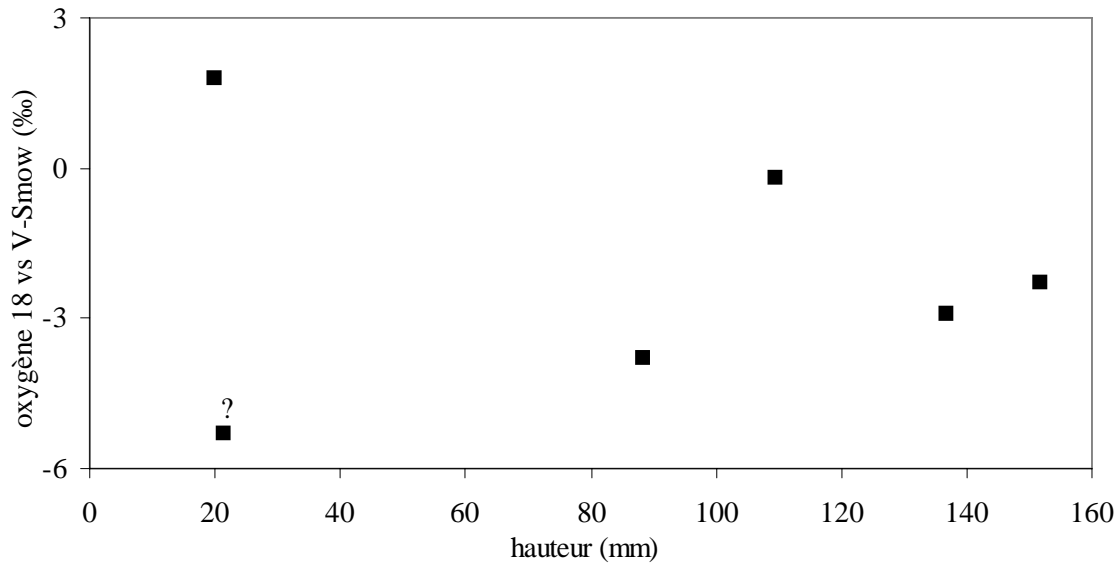


Figure 117 : Oxygène-18 en fonction de la hauteur de pluie à l'échelle événementielle.

À l'échelle mensuelle, l'observation des teneurs isotopiques se résume au seul mois de juillet du fait de l'échantillonnage tardif évoqué précédemment pour trois échantillons sur 4 pour septembre 2003. Les moyennes mensuelles de juillet 2003 sont obtenues après pondération des teneurs individuelles par des hauteurs de pluies correspondantes (tableau 16). Une comparaison entre ces données mensuelles partielles et les données annuelles historiques n'est pas envisageable. Cependant, une confrontation entre les gammes de variation peut être acceptable. Les gammes de variations des données historiques sont de -4,5 à -3,2 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et -38 à -20 ‰ pour $\delta^2\text{H}$ toutes stations confondues. Les compositions moyennes sont de 4,1‰ et -31‰ respectivement pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ à la station de Parakou la plus proche de notre zone.

Période	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Moyenne	$(-2,9) \pm 1,9$	$(-3,2) \pm 18,7$

Tableau 16 : Moyenne isotopique du mois de juillet 2003 pour les précipitations.

IV.3.4- Caractérisation des réservoirs souterrains

Les analyses isotopiques sont réalisées à la fois pour les réservoirs d'altérite et de socle (tableau 17). Comme pour les précipitations, l'échantillonnage concerne uniquement les périodes de début (juillet 2003) et cœur de saison humide (septembre 2003), donc en période de basses et hautes eaux.

Dans les réservoirs d'altérite, les teneurs varient de -4,1 à -3,6 et de -19,1 à -17,0 ‰ respectivement pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ contre -4,1 à -3,6 et -19,8 à -16,4 ‰ respectivement pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ pour le socle. Ces gammes sont quasi identiques et plus resserrées que pour les précipitations, traduisant une homogénéité isotopique. Les moyennes mensuelles sont identiques. En juillet 2003, le prélèvement a eu lieu avant les premières précipitations échantillonnées afin de connaître le signal initial des eaux souterraines avant les premières recharges importantes. La composition isotopique initiale des altérites est de -3,7 et -17,2 ‰ contre -3,9 et -17,7 pour le socle respectivement pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$. Ces eaux sont plus appauvries que les pluies qui ont eu lieu après leur prélèvement. Mais les signatures des altérites et du socle apparaissent quasi identiques (fig. 118). La comparaison pluie/eau souterraine ne peut être réalisée pour le mois de septembre 2003, du fait de la collecte tardive des pluies de ce mois. Mais la moyenne des altérites (-3,8 ‰) et du socle (-3,9 ‰) en $\delta^{18}\text{O}$ sont tout aussi identiques comme en juillet 2003.

Période	Station	Date	Altérite		Socle	
			$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Juillet 2003	Ananiga	29/07/02	-3,7	-17,0	-3,8	-17,9
	Ananiga	06/07/03	-3,7	-18,1	-3,9	-17,6
	<i>Djapengou</i>	<i>08/07/03</i>	<i>-3,6</i>	<i>-17,4</i>	<i>-3,8</i>	<i>-17,8</i>
	<i>Foyo</i>	<i>06/07/03</i>			<i>-3,9</i>	<i>-18,0</i>
	<i>Gniouri</i>	<i>09/07/03</i>	<i>-3,6</i>	<i>-17,0</i>	<i>-3,9</i>	<i>-16,4</i>
	<i>Kparsi</i>	<i>08/07/03</i>	<i>-4,1</i>	<i>-17,1</i>	<i>-3,9</i>	<i>-17,9</i>
	<i>Kpégounou</i>	<i>08/07/03</i>	<i>-4,0</i>	<i>-17,5</i>	<i>-3,9</i>	<i>-18,3</i>
	<i>Moné</i>	<i>06/07/03</i>	<i>-3,9</i>	<i>-18,1</i>	<i>-4,1</i>	<i>-18,4</i>
	<i>Nodianguï</i>	<i>09/07/03</i>	<i>-3,3</i>	<i>-15,6</i>	<i>-3,6</i>	<i>-17,2</i>
	Moyenne		-3,7 ± 0,3	-17,2 ± 0,8	-3,9 ± 0,1	-17,7 ± 0,6
Septembre 2003	Ananiga	08/09/03	-3,8	-16,3	-4,0	-17,8
	<i>Djapengou</i>	<i>09/09/03</i>	<i>-3,9</i>	<i>-17,2</i>	<i>-3,7</i>	<i>-18,0</i>
	<i>Foyo</i>	<i>09/09/03</i>			<i>-4,0</i>	<i>-19,8</i>
	<i>Kparsi</i>	<i>09/09/03</i>	<i>-3,7</i>	<i>-19,1</i>	<i>-4,1</i>	<i>-17,5</i>
	<i>Kpégounou</i>	<i>09/09/03</i>	<i>-3,9</i>	<i>-17,3</i>	<i>-4,1</i>	<i>-19,4</i>
	<i>Moné</i>	<i>08/09/03</i>			<i>-3,8</i>	<i>-18,5</i>
	Moyenne		-3,8 ± 0,1	-17,5 ± 1,2	-3,9 ± 0,2	-18,5 ± 0,9

Tableau 17 : Teneurs isotopiques dans les réservoirs d'altérites et de socle (les altérites sans correspondant socle sont indiquées en italique).

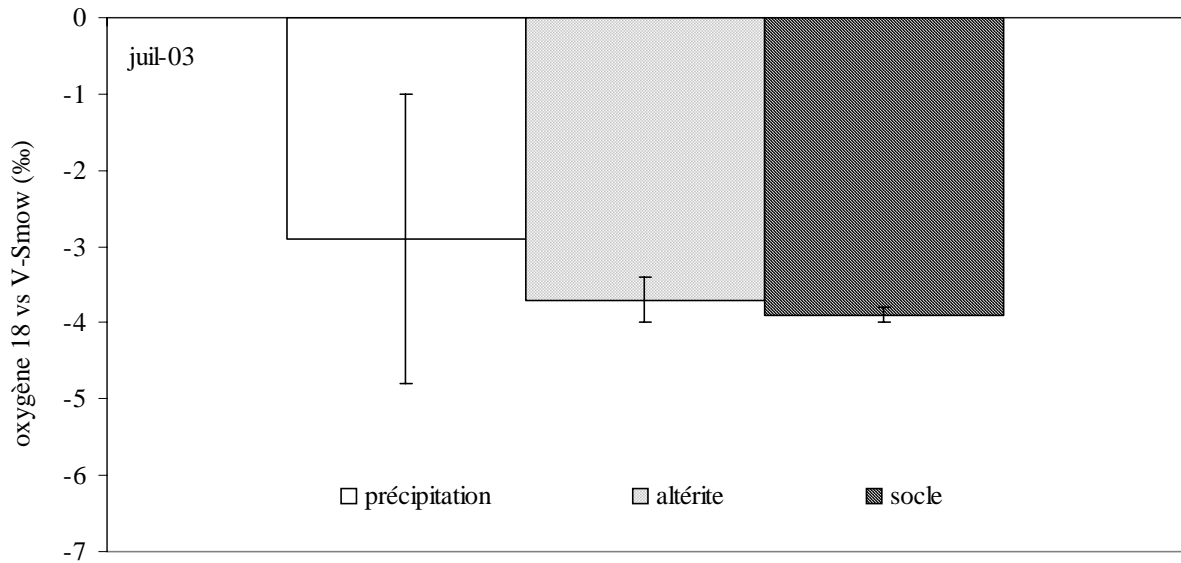


Figure 118 : Différentiation isotopique (moyenne et écart-type) entre les eaux de recharge et les eaux souterraines pour le mois de juillet 2003.

La distinction isotopique entre réservoirs d'altérite et de socle est également possible à partir des couples puits/forage. Sur les 8 couples (fig. 119) pour le mois de juillet 2003, 6 indiquent un enrichissement en oxygène-18 du puits (altérite) par rapport au forage voisin (socle). Ceci nous semble logique étant donné que les réservoirs d'altérite sont sous plus forte influence des eaux de pluies (relativement plus enrichies).

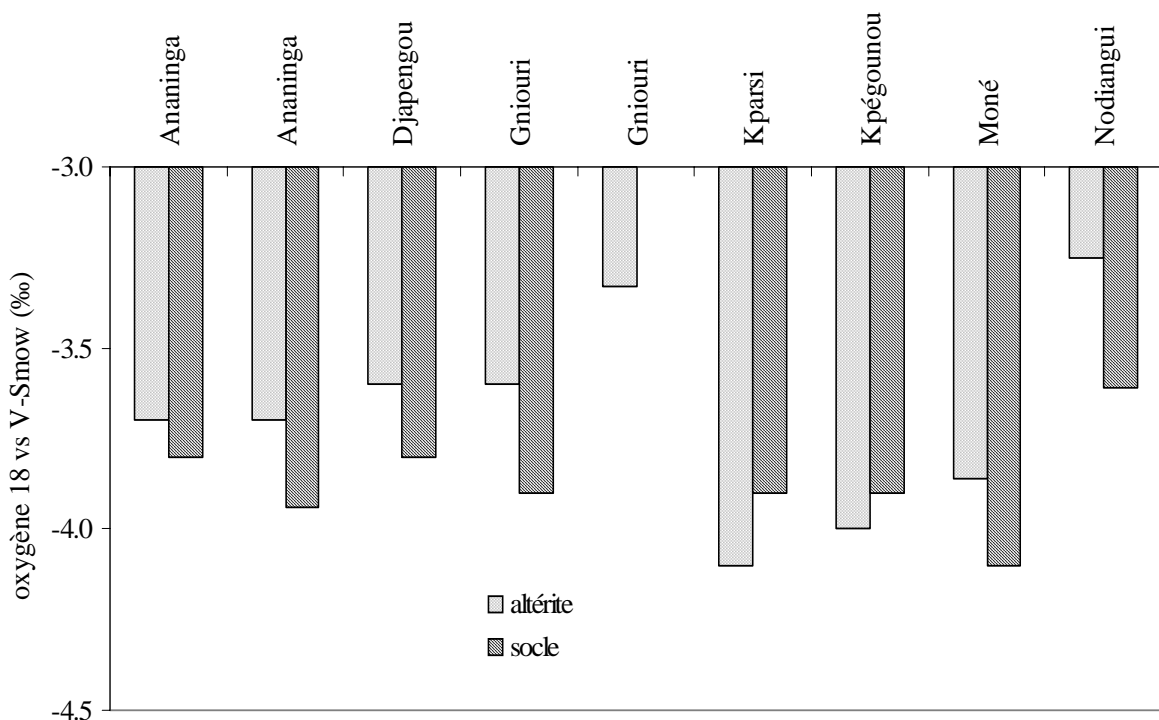


Figure 119 : Comparaison des teneurs isotopiques entre réservoirs d'altérite et de socle.

IV.3.5- Caractérisation des écoulements de surface

Comme pour l'étude hydrochimique, l'étude isotopique des écoulements de surface est abordée dans un premier temps à partir des écoulements de base et ensuite à partir des événements ponctuels de crues suivis. Les points de mesure sont toujours les stations limnimétriques d'Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.

Pour les écoulements de base, on dispose de 7 échantillons (tableau 18). Les conductivités électriques (C.E.) correspondantes sont également mentionnées. Les teneurs varient de -4,0 à -1,9 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de -20,5 à -4,3‰ pour $\delta^2\text{H}$ sur l'ensemble des deux années. Les valeurs de 2002 apparaissent particulièrement enrichies en $\delta^2\text{H}$.

Station	Date	Q (m ³ /s)	C.E. (μS/cm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Ara-Pont	29/07/02 10:05	0,015	30	-2,3	-6,8
Ara-Pont	02/10/03 11:45	0,100	43	-3,8	-18,5
Donga-Kolo	29/07/02 15:20	0,200	54	-1,9	-4,3
Donga-Kolo	01/10/03 16:50	0,973	61	-3,9	-18,6
Donga Pont	29/07/02 18:29	0,810	62	-3,5	-4,3
Donga Pont	09/10/03 12:35	0,520	61	-4,0	-20,5
Donga Pont	16/11/03 08:50	0,350	106	-2,7	-12,3

Tableau 18 : Teneurs isotopiques dans les écoulements de base.

Les compositions en $\delta^{18}\text{O}$ semblent indiquer un enrichissement au fur et à mesure que le débit baisse (fig. 120) témoignant soit d'une évaporation, soit d'un apport d'eaux superficielles plus enrichies que les sources plus profondes. Les écoulements de base devraient représenter l'exutoire des flux souterrains et leur signature isotopique refléter celle de ces réservoirs. Le phénomène contraire témoignerait de l'absence d'une bonne connexion entre les réservoirs profonds et le réseau hydrographique en accord avec les observations physico-chimiques. Le rapprochement avec les précipitations conforte l'idée d'un important apport de flux très récents probablement de subsurface. Cette hypothèse concorde bien avec les mesures de conductivité électrique correspondantes.

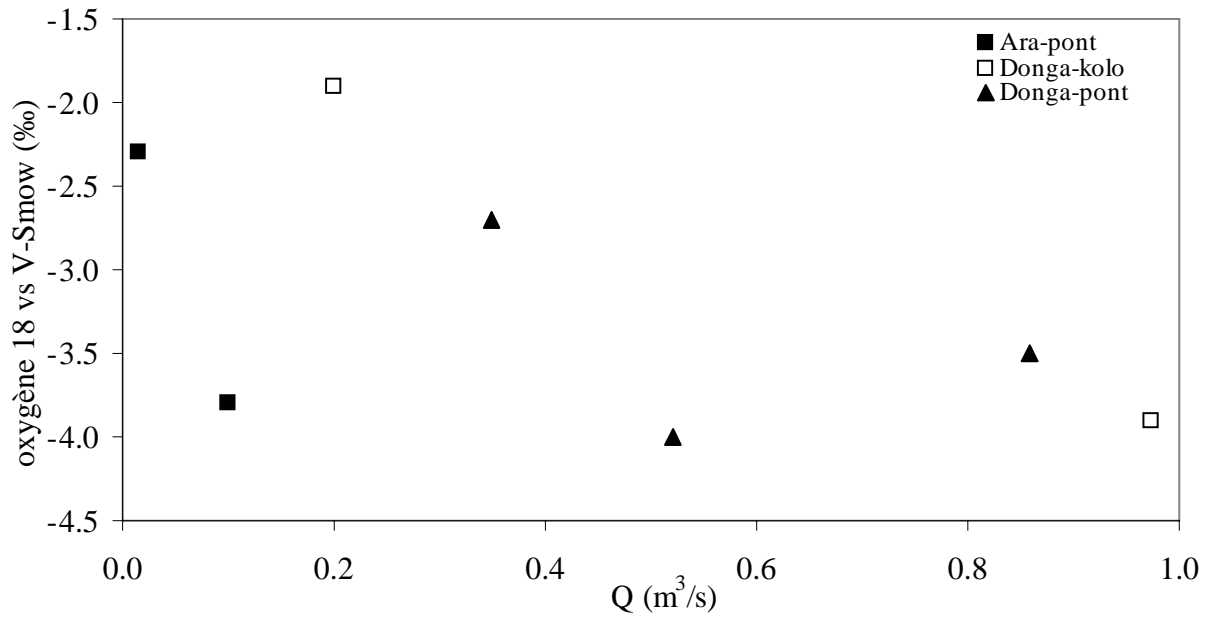


Figure 120 : Teneurs en oxygène-18 dans les écoulements de base en fonction du débit.

Toutes les crues (1, 2 et 3) ont été échantillonnées mais les figures 121, 122 et 123 illustrent graphiquement les variations en $\delta^{18}\text{O}$ dans la crue 3 pour laquelle toutes les trois stations ont été suivies. Une baisse des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ se produit pendant la crue, suivie d'une remontée à la décrue. Ces variations peuvent être le fait de l'origine très diverse des composantes de l'écoulement lors des crues ou simplement le fait de la forte variabilité isotopique au sein de l'évènement pluvieux. Un protocole d'échantillonnage adéquat basé sur des prélèvements en continu et simultanés des pluies et des crues avec un pas d'échantillonnage ajusté sur le temps de réponse du bassin devrait permettre de trancher entre ces deux hypothèses. Les variations isotopiques apparaissent très concordantes avec celles des autres éléments chimiques. L'exemple le plus marquant est la variation en oxygène 18 en parallèle avec la C.E.. Ces deux paramètres évoluent quasiment de façon similaire à toutes les stations. Cette fluctuation type avait été associée à la prédominance de ruissellement rapide lors de la crue et à un apport plus important d'eaux des réservoirs superficiels à la décrue. Sur cette base, l'appauvrissement isotopique (-4,2 à -5,2 ‰ à Ara-Pont, -5,0 à 5,4 ‰ à Donga-Kolo et -4,4 à -5,0 ‰ à Donga-Pont) lors de la crue traduirait des teneurs relativement appauvries des gouttes de pluies à cet instant. L'enrichissement isotopique à la décrue, correspondant à un apport souterrain, dépasse les -4 ‰, valeur bien proche de celle des écoulements de base et des réservoirs souterrains.

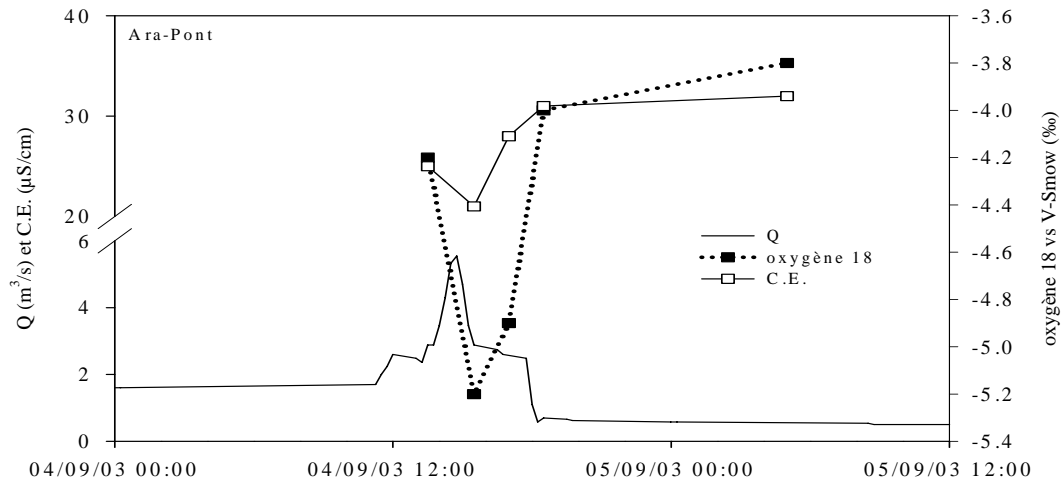


Figure 121 : Variation en oxygène-18 dans la crue 3 à Ara-Pont.

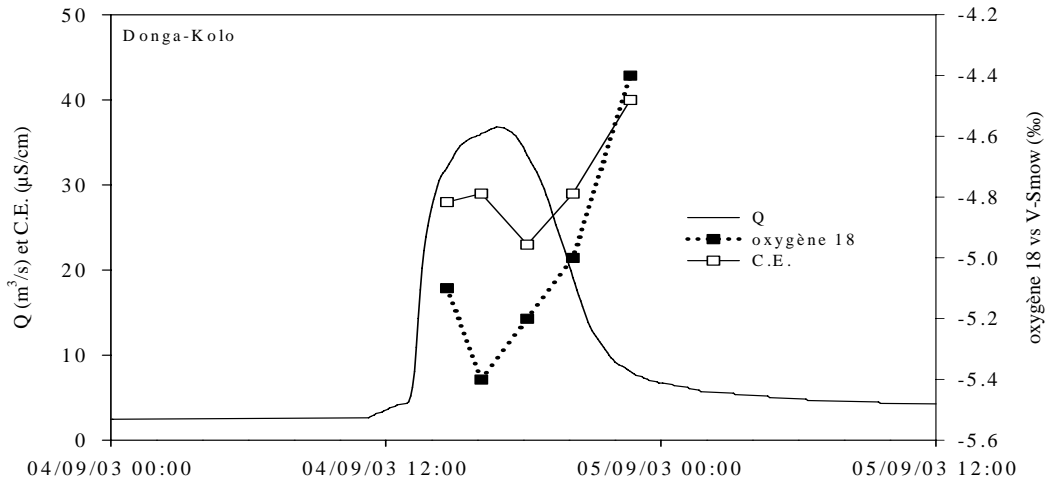


Figure 122 : Variation en oxygène-18 dans la crue 3 à Donga-Kolo.

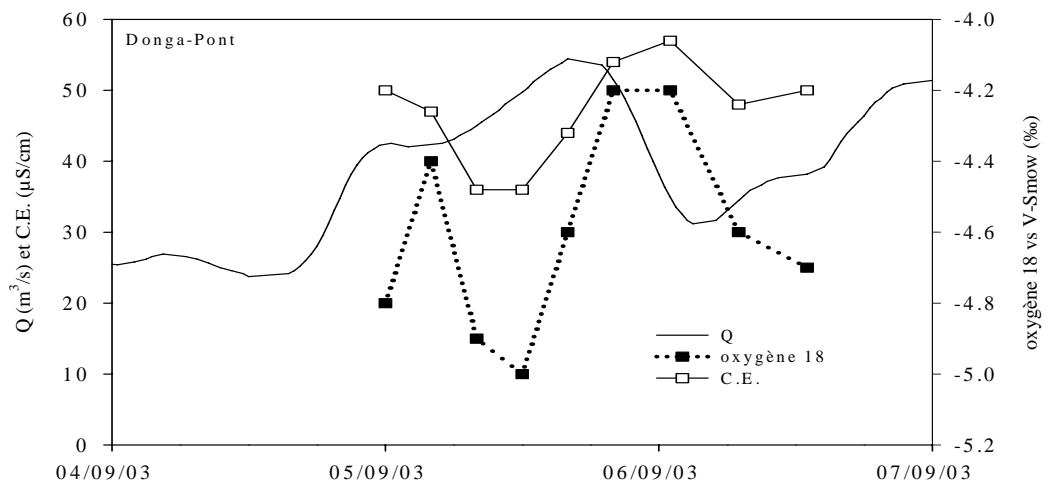


Figure 123 : Variation en oxygène-18 dans la crue 3 à Donga-Pont.

IV.3.6- Synthèse et compréhension des processus

Dans un digramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (fig. 124), les précipitations se répartissent le long de la Droite Météorique Mondiale (DMM : $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$). Les eaux prélevées 12 heures après la pluie (3 échantillons) s'écartent fortement de cette droite, contrairement aux autres et reflètent une évaporation importante.

La Droite Météorique Locale, calculée sans ces 3 points (DML : $\delta^2\text{H} = 7,5\delta^{18}\text{O} + 8,3$) reste logiquement proche de la DMM ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$). À l'échelle sous-régionale, d'autres DML ont déjà été définies :

- Kano au Nigéria : $\delta^2\text{H} = 7,1\delta^{18}\text{O} + 4,4$ (mesures mensuelles, AIEA/OMM, 1998),
- synthèse des stations soudano-sahéliennes : $\delta^2\text{H} = 7,6\delta^{18}\text{O} + 7,1$ (Joseph *et al.*, 1992).

La pente de 7,5 de la DML pour notre zone est proche de celle observée aux différentes stations, notamment celle obtenue par synthèse des données des stations soudano-sahéliennes (Joseph *et al.*, 1992). L'ordonnée à l'origine de 8,3 (+ 1 % d'incertitude) se rapproche également de celle de la DMM. Cette cohérence des résultats témoigne d'une origine commune des pluies liée au flux de mousson issu du Golfe de Guinée (Taupin *et al.*, 2000). Une pente inférieure à 8 et une ordonnée à l'origine inférieure à 10 ont été par ailleurs attribuées à une reprise évaporatoire des gouttes de pluie au cours de leur chute en milieu sahélien (Mathieu et Bariac, 1996 ; Taupin *et al.*, 2000). Mais nous ne savons pas si cette explication peut être retenue dans notre contexte soudanien où l'humidité relative est toujours plus élevée qu'au Sahel.

La signature isotopique des réservoirs d'altérite apparaît comme la signature moyennée des pluies (fig. 124). Cette signature reste très proche de celle des réservoirs de socle. Tout ceci indique une homogénéité isotopique du compartiment souterrain contrairement aux précipitations et un temps de résidence quasi identique. Aucune droite d'évaporation n'est observée, indiquant que la mise en place des eaux souterraines est rapide, sans fractionnement à la recharge. Cette observation est en accord avec les résultats de l'hydrodynamique qui montraient une recharge (début de saison humide) suivie d'une vidange rapide (fin de saison humide) des réservoirs souterrains (sur les trois années d'observation piézométrique). En d'autres termes, les eaux souterraines sont régulièrement

renouvelées et aucun effet mémoire n'est identifiable. Ceci confirme les hypothèses établies suite à l'analyse des données des paramètres physico-chimiques dans le réservoir de socle.

L'écoulement de base présente dans l'ensemble une grande variabilité isotopique, mais moins que les précipitations (fig. 124) alors qu'ils devraient se situer à des valeurs voisines de celles observées dans les nappes (altérite et socle). Ce phénomène traduit la très forte influence de la signature des pluies directement sur l'écoulement et la contribution d'un réservoir superficiel à vidange rapide où l'homogénéisation de la variabilité isotopique des pluies n'a pas le temps de se réaliser comme dans les nappes d'altérite et de socle. Ceci complexifie la caractérisation du mélange que constituent les eaux de rivière.

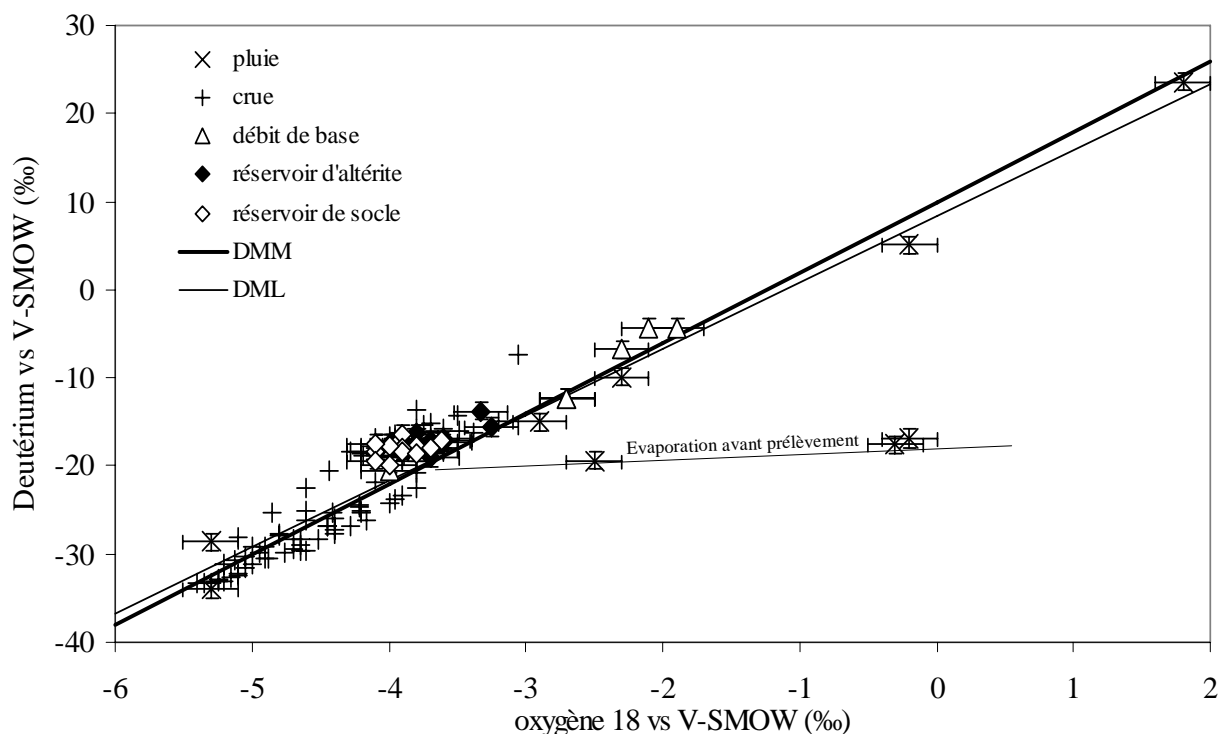


Figure 124 : Relation oxygène-18 et deutérium dans les précipitations, les écoulements de surface et les réservoirs souterrains.

On peut retenir une très grande variabilité isotopique des précipitations qui influencent fortement la signature des écoulements de surface. La très forte homogénéité isotopique des eaux souterraines ne permet pas d'identifier les différents compartiments de ce réservoir. Aussi, l'usage des isotopes stables de l'eau comme traceurs géochimiques et outils de caractérisation de l'écoulement total de surface aurait nécessité un échantillonnage spatio-temporel beaucoup plus resserré. Néanmoins, l'apport fondamental de cet outil, demeure la mise en évidence d'une absence d'évaporation des eaux dans l'écoulement de base.

IV.4- Synthèse et fonctionnement hydrogéochimique

Nous établissons ici un récapitulatif des résultats importants sur l'hydrochimie et la géochimie isotopique afin de dégager les spécificités hydrogéochimiques de chaque composante de l'écoulement total de surface.

IV.4.1- Spécificités hydrochimiques des compartiments hydriques

Il était question dans le chapitre IV.2 de dégager les caractéristiques physico-chimiques (paramètres physico-chimiques, éléments majeurs et éléments traces) de toutes les composantes qui pourraient éventuellement contribuer à l'écoulement total de surface.

Les précipitations apparaissent très faiblement minéralisées ($10,5 \pm 2 \mu\text{S/cm}$) avec un faciès chimique, chloruré calco-magnésien dominant en saison humide (les rares pluies de saison sèche sont bicarbonatées calco-magnésiennes). Les espèces Si, Ca, HCO_3 , Sr et Ba sont les éléments chimiques majeurs et traces dominants des précipitations. Les valeurs caractéristiques sont indiquées en annexe 33, 34 et 35.

À l'échelle de l'ensemble du bassin, les eaux souterraines, à tendance générale acide ($5 < \text{pH} < 7$) avec une température de $27\text{-}28^\circ\text{C}$, présentent une minéralisation relativement faible. La nappe phréatique des altérites présente une C.E. de l'ordre de $155 \pm 70 \mu\text{S/cm}$ contre $288 \pm 80 \mu\text{S/cm}$ pour les eaux de socle sous-jacentes. Avec le silicium ($27,2 \pm 3,9 \text{ mg/l}$ pour les altérites contre $34,80 \pm 5,02 \text{ mg/l}$ pour les réservoirs de socle), le strontium et le baryum, le faciès bicarbonaté calco-magnésien commande largement la signature chimique des eaux souterraines en dehors de quelques sites probablement sous forte influence de pollution. À l'échelle du versant, les eaux souterraines présentent des caractéristiques physico-chimiques globalement similaires (températures et des pH) à celles de l'ensemble du bassin. Seule la station Aval dégage des particularités du fait d'une influence probable de réactions d'oxydo-réduction. Les plus faibles valeurs (C.E. : 30 à $130 \mu\text{S/cm}$) sont enregistrées dans les horizons de 2 m avec de très fortes variabilités temporelles du fait d'une sensibilité plus grande aux précipitations. Les eaux captées à 10 et 20 m (les C.E. sont très comparables : $100 < \text{C.E.} < 300$) semblent caractéristiques d'un même réservoir en accord avec les observations hydrodynamiques. Mais de fortes variabilités spatiales traduisant des ruptures hydrauliques en accord avec les observations géophysiques peuvent s'observer. Du point de vue temporel, les plus fortes variations sont observées à la station Aval, confirmant une fois de plus la particularité de ce site. Les valeurs caractéristiques de chaque espèce chimique (majeure et trace) pour les réservoirs d'altérite et de socle sont indiquées en annexe 36-46.

Les écoulements de base indiquent une indépendance entre la minéralisation et le débit, hormis pour les débits les plus faibles où la C.E. augmente. De l'amont vers l'aval du bassin, la minéralisation augmente sensiblement. La signature des éléments majeurs des écoulements de base, même si elle n'est pas totalement identique à celles des eaux de subsurface, s'y rapproche davantage contrairement aux autres réservoirs (fig. 125, 126, annexes 47, 48 et 49).

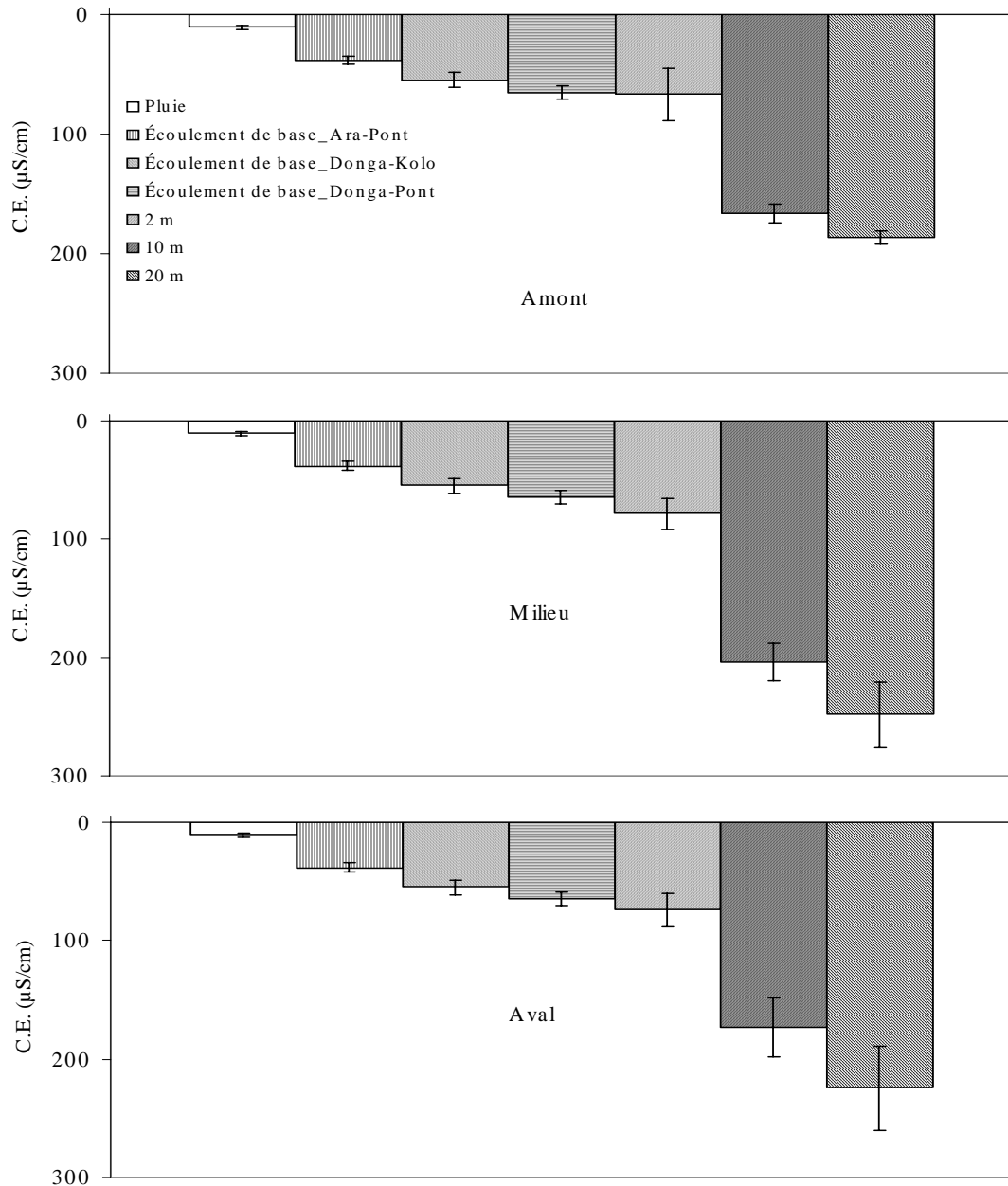


Figure 125 : C.E. moyenne caractéristique des pluies, des écoulements de base et des réservoirs d'altérite.

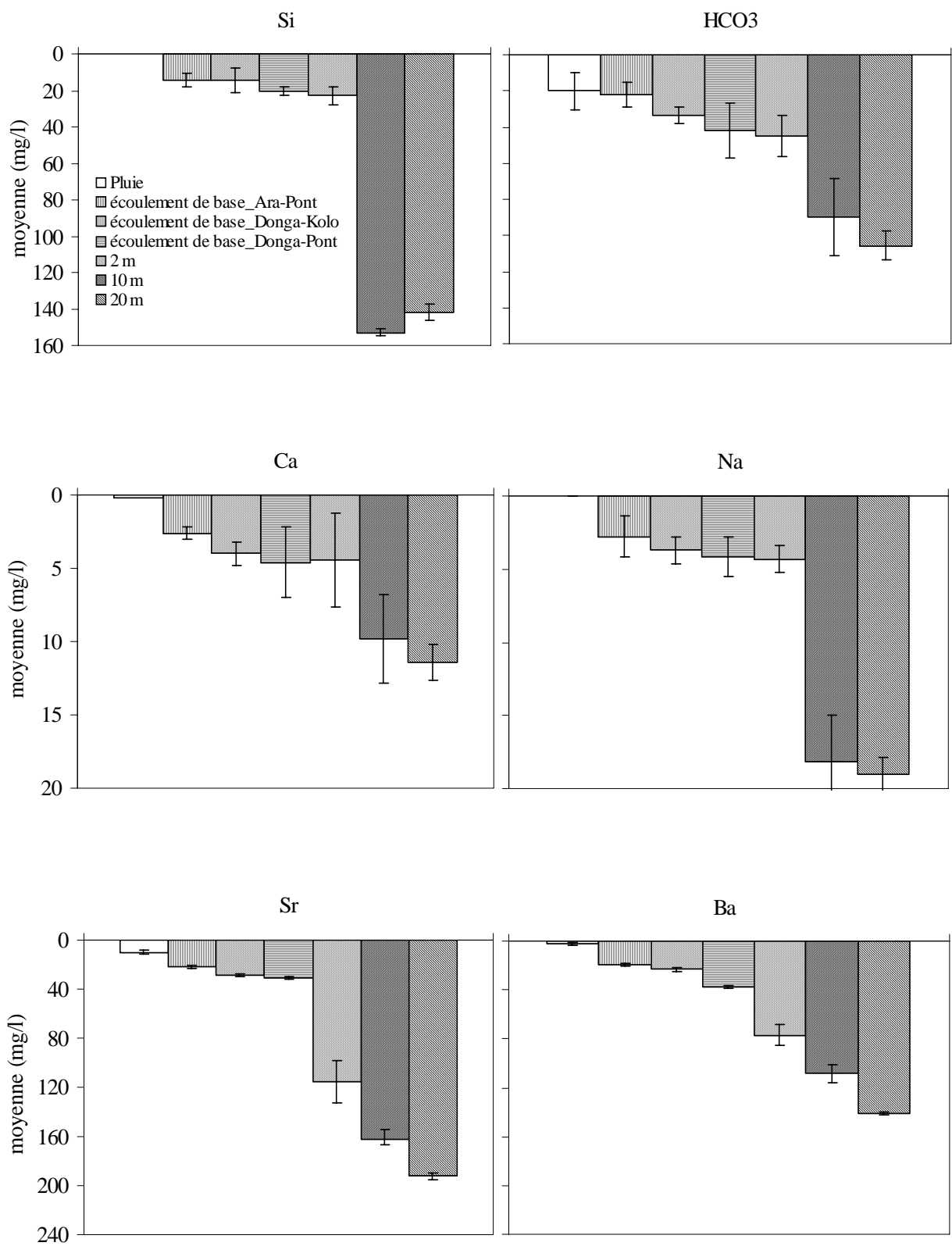


Figure 126 : Compositions chimiques caractéristiques des pluies, des écoulements de base, des réservoirs d'altérites à 2, 10 et 20 m à la station Amont.

En période de crue une fluctuation type, caractérisée par une chute en début de crue suivie d'un recouvrement progressif vers les valeurs des écoulements de base (en fin de crue) s'observe. Cette évolution est rigoureusement respectée par C.E., Si, Ca, Mg, Na, HCO₃, Sr et Ba. Le minimum des concentrations est généralement observé au pic de crue à Ara-Pont et Donga-Kolo tandis qu'à l'exutoire, ce minimum précède l'enregistrement du débit maximum. L'écoulement apparaît ainsi composé essentiellement de ruissellement rapide en amont et de façon prépondérante de flux de subsurface en aval du bassin.

Application : rapport entre éléments chimiques dissous : nous présentons d'une part (A) un exemple de relation chimique permettant une nette différenciation entre les réservoirs et d'autre part (B) un exemple de relation permettant le schéma contraire. À titre de rappel, les éléments chimiques qui discriminent mieux les réservoirs sont Si, Ca, Na, HCO₃, Sr et Ba.

Pour les éléments majeurs, le cas (A) sera donc apprécié par la relation $Na = f(Si)$; les autres relations composées à partir des meilleurs éléments discriminants étant identiques à (A). Le cas (B) est représenté par la relation $Cl = f(Si)$; les autres relations composées à partir de K, NO₃, SO₄ étant identiques à (B).

Pour les éléments traces, le cas (A) est représenté par la relation $Ba = f(Sr)$ et le cas (B) par Sr vs B. Les autres relations ne seront pas indiquées afin d'éviter les répétitions.

Pour les éléments majeurs, à la station d'Ara-Pont, les rapports sont formés à partir de la composition chimique :

- des précipitations,
- des écoulements (débits de base et crues),
- des affluents à la rivière Ara en période d'étiage,
- des réservoirs d'altérite du site expérimental (1, 2, 10 et 20 m de profondeur),
- des réservoirs d'altérite du groupe A (cf. chapitre IV.2.3.5.1.2),
- des réservoirs de socle (forages villageois).

L'ensemble des écoulements de surface (crues et débit de base) se situe entre les précipitations et les eaux superficielles (notamment Amont_2m, fig. 127A). Ceci traduit que les écoulements de surface, notamment les crues, sont la résultante du mélange de ces deux types d'eau. Les réservoirs plus profonds influent donc très peu sur les écoulements. Mais

cette tendance apparaît quelque peu différente selon la crue. La crue 1 s'achève par des teneurs proches de celles des horizons de 2 m tandis que la crue 3 tend plutôt vers des réservoirs qui semblent avoir les mêmes spécificités que les écoulements de base (rivière principale et affluents). Pour le cas B (fig. 127B), aucune différenciation chimique entre les réservoirs n'est possible du fait de Cl.

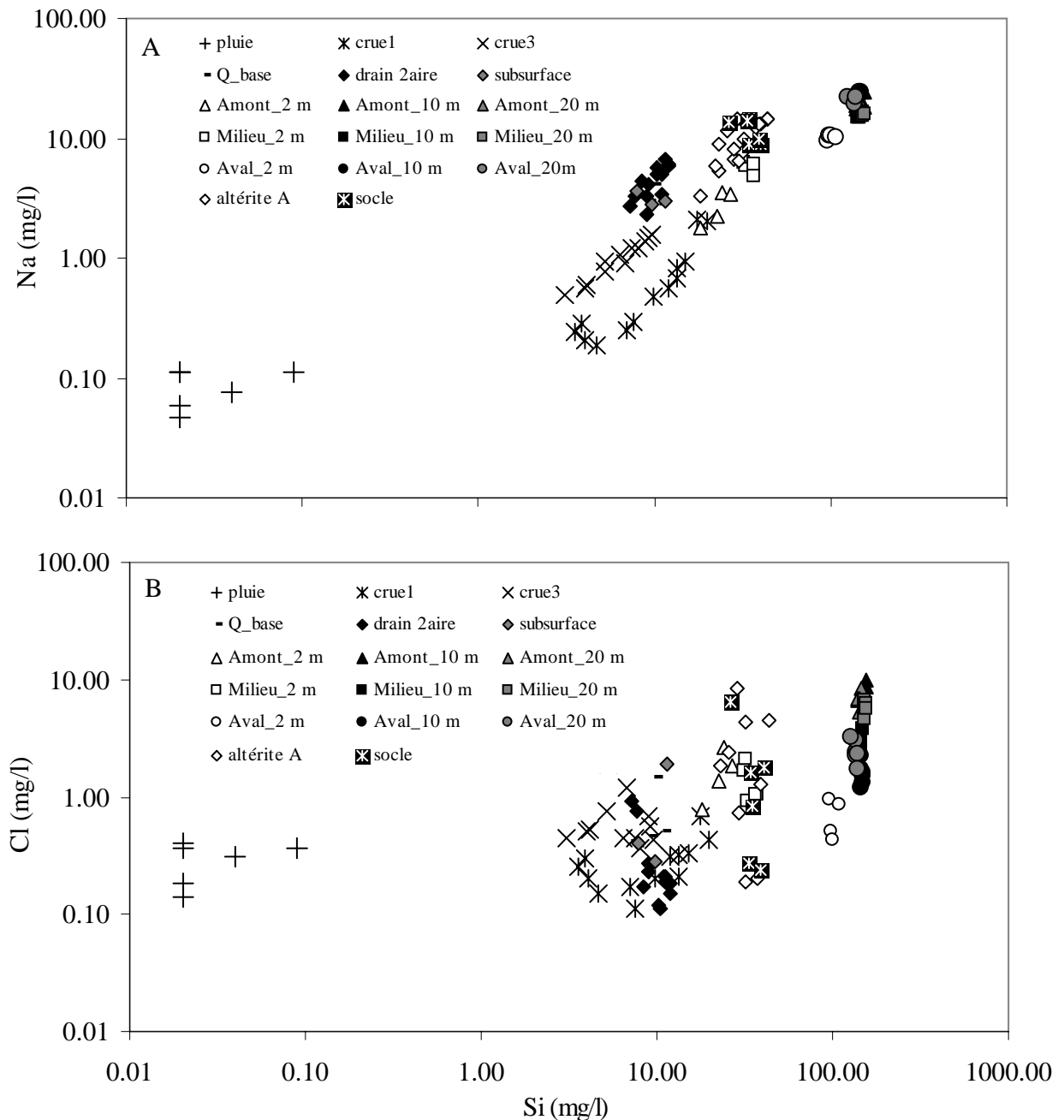


Figure 127 : Na et Cl vs Si dans les pluies, les écoulements de surface à Ara-Pont, des drains secondaires à la rivière Ara et les réservoirs d'altérite et de socle.

Pour la station de Donga-Kolo, les rapports entre les éléments sont formés à partir des mêmes composantes hydriques que celles d'Ara-Pont. La seule crue, échantillonnée est la crue 3. Elle se positionne entre les précipitations et les écoulements de base (fig. 128) en accord avec les observations précédentes. Le cas B (Si vs Cl) n'est pas représenté ici du fait de la similarité avec ce qu'on observe à Ara-Pont.

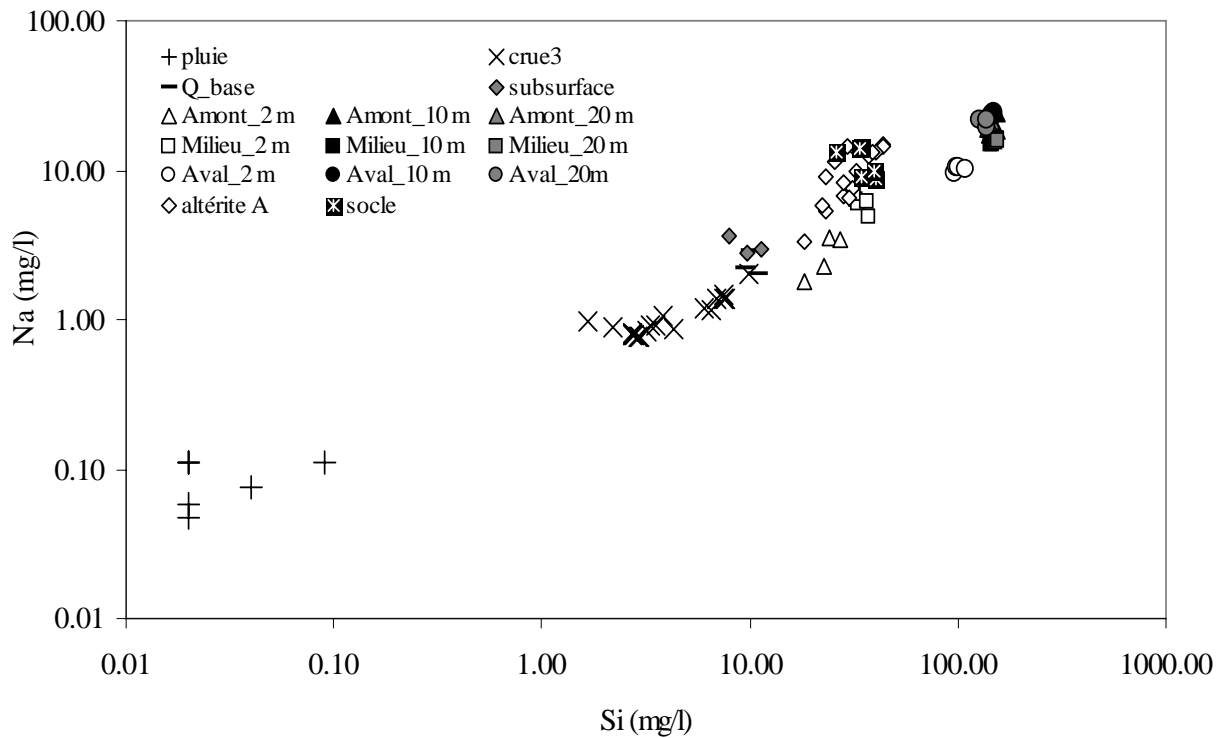


Figure 128 : Na vs Si dans les pluies, les écoulements de surface à Donga-Kolo et les réservoirs d'altérite et de socle.

Pour Donga-Pont, les relations entre éléments sont appréciées sur la base des valeurs aux mêmes réservoirs que les deux premières stations. Mais la référence aux teneurs du versant expérimental a un caractère indicatif du fait de l'éloignement de ce site de l'exutoire.

La crue 1 se positionne entre les précipitations et des eaux souterraines dont les caractéristiques semblent très proches de celle des eaux de 2 m du site expérimental Amont (fig. 129). Cette crue présente donc un comportement identique à la crue 1 d'Ara-Pont survenue à la même date.

Les crues 2 et 3 mettent plutôt en évidence une influence, aussi bien des écoulements de base relativement à Si que des eaux de 2 m de la station Amont relativement à Na.

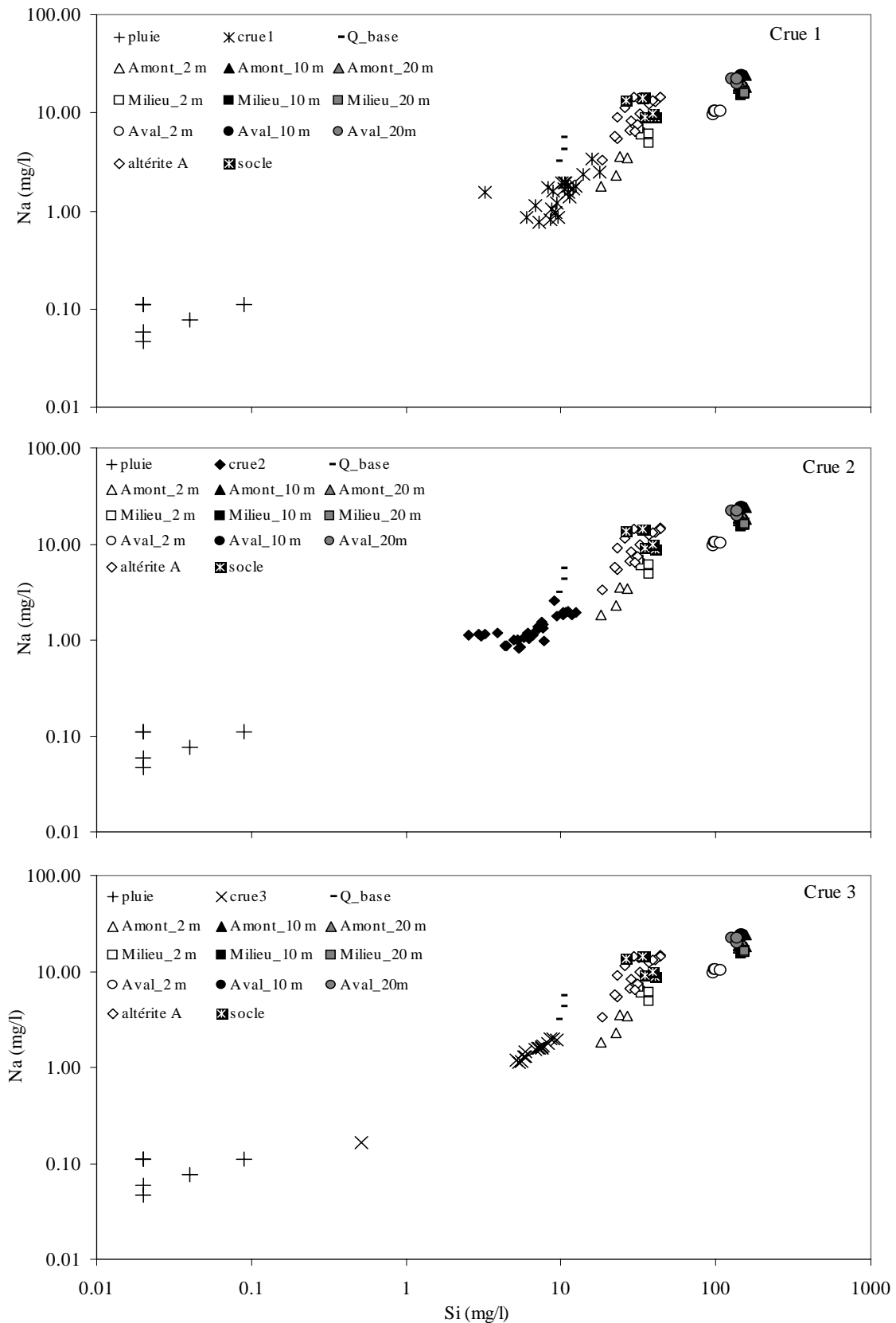


Figure 129 : Si vs Na dans les pluies, les écoulements de surface à Donga-Pont et les réservoirs d'altérite et de socle.

Pour les éléments traces et pour la station d'Ara-Pont, les écoulements (débit de base et crue) semblent traduire un mélange entre les eaux de recharge (les précipitations) et les eaux superficielles d'environ 2 m de profondeur, en accord avec les observations faites pour les éléments majeurs. Mais les deux crues sont situées entre un pôle pluie et un pôle écoulement de base ; seule la crue 3 l'était pour les majeurs. Toutes ces observations sont nettement visibles avec la relation $Ba = f(Sr)$. Elles ne le sont pas avec $B = f(Sr)$ (fig. 130).

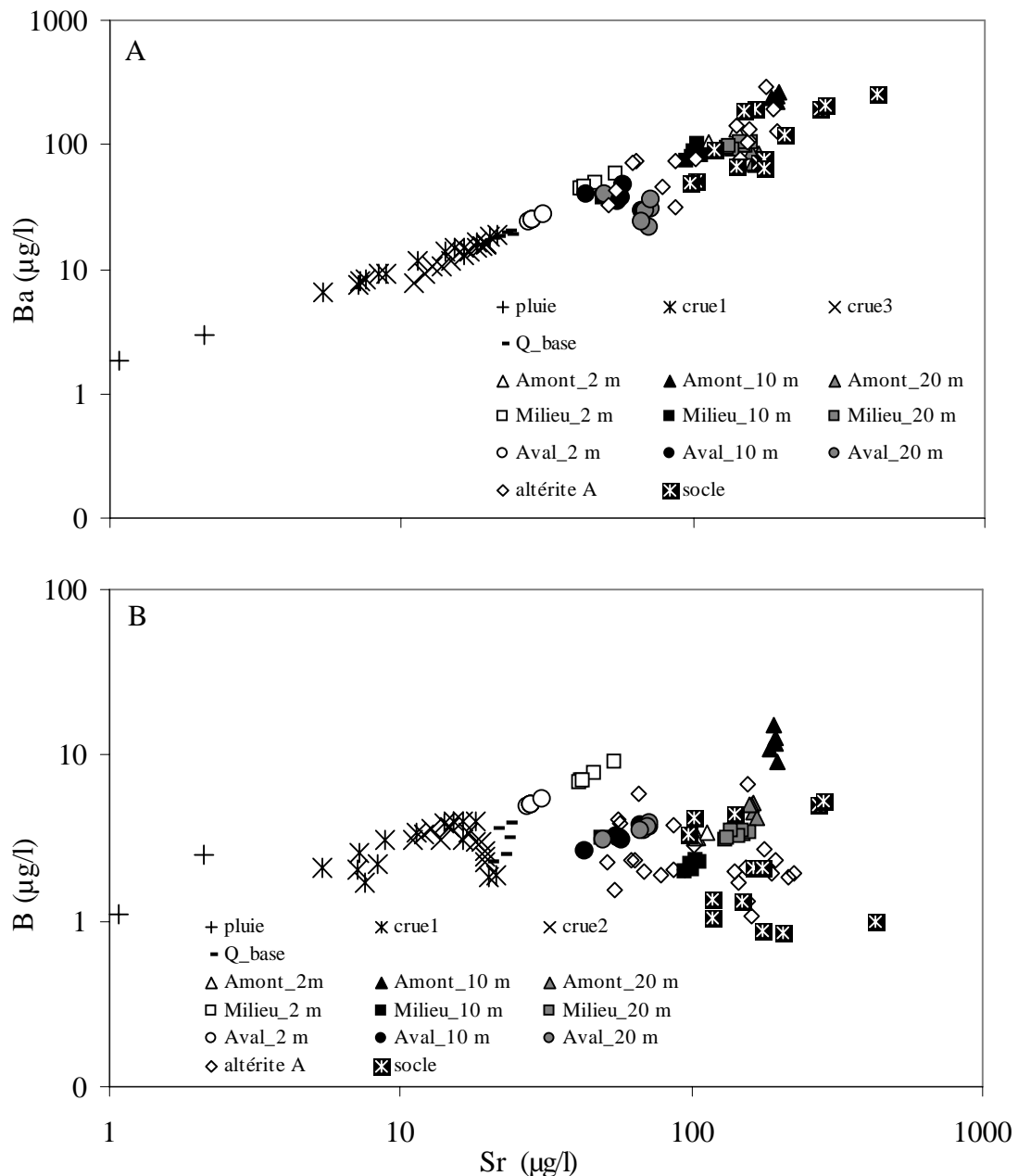


Figure 130 : Ba et B vs Sr dans les pluies, les écoulements de surface à Ara-Pont et les réservoirs d'altérite et de socle.

Pour la station de Donga-Kolo, les eaux de 2 m de profondeur, mesurées dans le versant expérimental du bassin versant d'Ara-Pont sont prises comme référence. Elles apparaissent très proches de celles des écoulements de base qui constituent ainsi le pôle souterrain. La crue 3 se positionne entre ce pôle et les précipitations. Tout comme pour Ara-Pont, seuls les éléments Sr et Ba décrivent bien le phénomène de mélange entre les eaux de recharge et les flux hypodermiques (fig. 131).

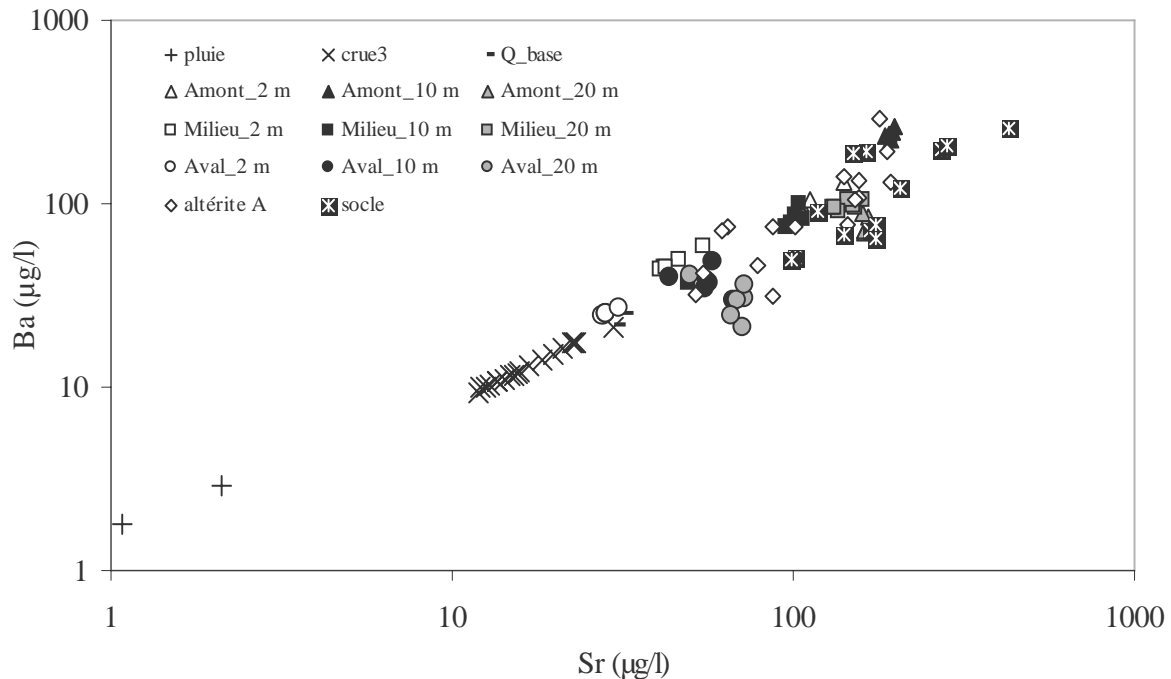


Figure 131 : Sr vs Ba pour les pluies, les écoulements de surface à Donga-Kolo et les réservoirs d'altérite et de socle.

Les rapports entre éléments pour la station de Donga-Pont, indiquent une nette différence entre les écoulements de base et les eaux de 2 m de profondeur et plus (fig. 132). Ceci peut se comprendre du fait de l'éloignement des deux points de mesure (les deux extrémités opposées du bassin).

Les crues 1 et 2 apparaissent être la somme des précipitations et de flux souterrains peu profonds dont les caractéristiques sont celles des eaux de 2 m de la station Aval et la crue 3, la somme des précipitations et des écoulements de base.

Par ailleurs, tout comme à Ara-Pont et Donga-Kolo, les caractéristiques des crues sont particulièrement proches des eaux à 2 m de la station Aval alors que pour les majeurs, ce rapprochement n'était possible qu'avec les eaux de 2 m de la station Amont.

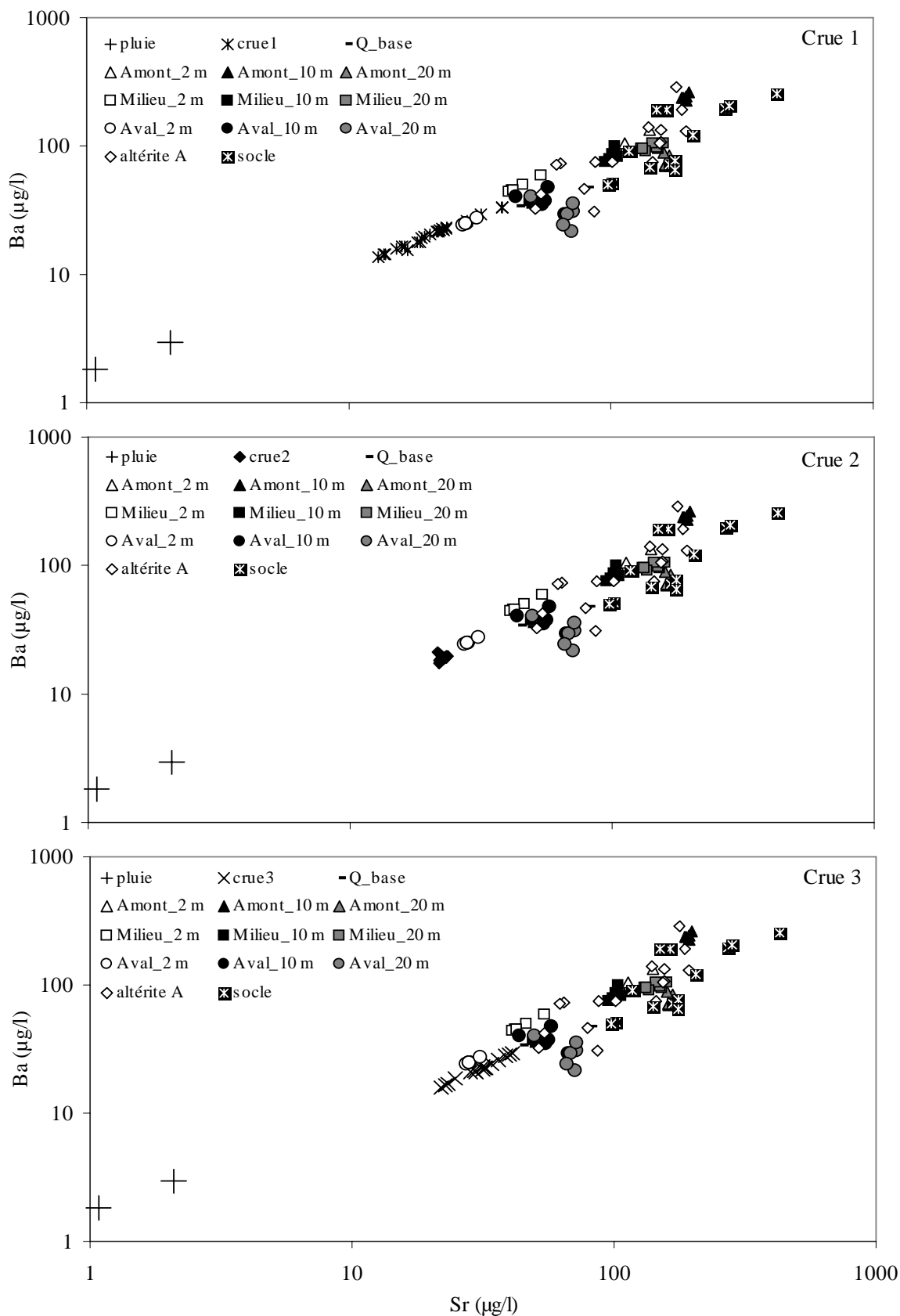


Figure 132 : Sr vs Ba dans les pluies, les écoulements de surface à Donga-Pont et les réservoirs d'altérite et de socle.

Application : diagramme de stabilité : l'autre approche consiste à tester l'état d'équilibre entre les phases minérales silicatées et les phases aqueuses au moyen d'un diagramme du système Ca-silicate (fig. 133).

Tous les écoulements (crue et débit de base) aux trois stations limnimétriques se situent dans le domaine de la kaolinite en accord avec la phase argileuse de l'aquifère. Les eaux de 2 m de profondeur du site expérimental à l'exception de la station Amont, se situent dans le domaine de stabilité de la montmorillonite. Ces eaux sont sous-saturées vis-à-vis de la silice amorphe, donc relativement jeunes. Cette observation témoigne une nouvelle fois des ressemblances entre les eaux de rivière et les eaux des couches superficielles du sol.

La majorité des eaux prélevées dans les puits villageois, au site expérimental à 2 m de la station aval et 10 et 20 m de toutes les autres stations sont situées dans le domaine de stabilité de Ca-montmorillonite et la plupart d'entre elles sont saturées vis-à-vis de la silice amorphe. Elles sont donc relativement plus anciennes. La forte adsorption des eaux par la montmorillonite qui est une argile gonflante à forte capacité de rétention est favorable à une dissolution à « long terme » de la silice et constitue un indicateur d'âge relatif des eaux.

Les eaux de forages plus profondes, captant éventuellement les fractures, se positionnent également dans le domaine de la montmorillonite. Cette position paraît paradoxale du fait des profondeurs relativement importantes, donc un temps de résidence plus grand ; on s'attendait à des teneurs en SiO_2 plus importantes. Ceci peut s'expliquer par le fait que les eaux de socle constituent la fraction percolante de la recharge. En d'autres termes ces eaux sont celles qui n'ont pas été retenues par les argiles sus-jacentes. Elles se retrouvent donc dans le socle plus ou moins sain dont l'altération est extrêmement lente.

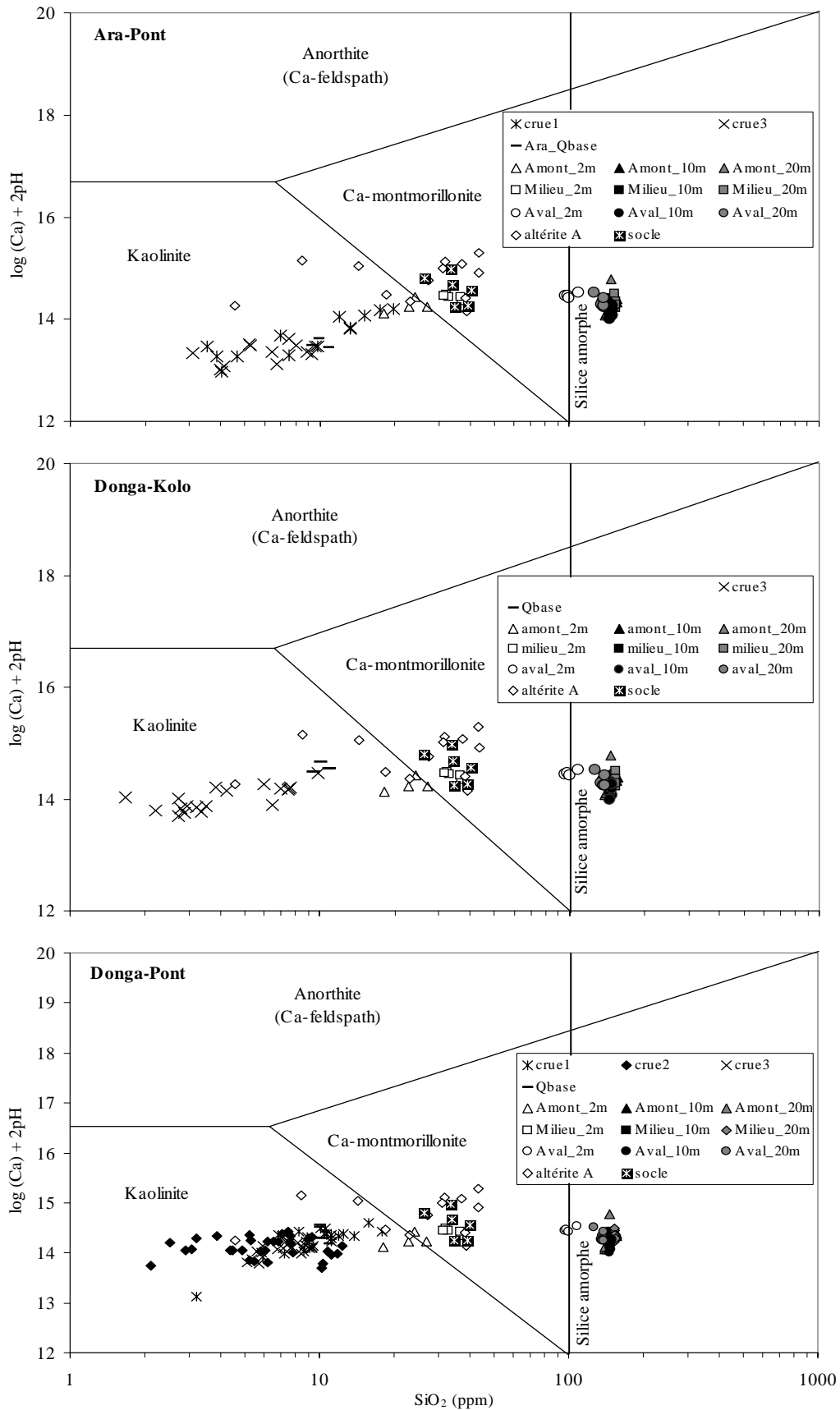


Figure 133 : Équilibre entre phase solide et phase aqueuse : domaine de stabilité du système argileux $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$.

IV.4.2- Spécificités isotopiques des compartiments hydriques

À l'issue de l'étude isotopique, il ressort que les isotopes stables de l'eau ne permettent pas une discrimination nette entre les compartiments souterrains mis en relief avec l'hydrochimie, du fait d'une forte homogénéité des signatures. À cela s'ajoute la très grande variabilité isotopique des précipitations qui complexifie le choix d'une teneur fixe représentative des eaux de pluies. Cette forte variabilité isotopique des précipitations se répercute également sur la signature des écoulements. Cependant la question fondamentale de l'origine des écoulements de base se trouve définitivement résolue du fait d'une absence claire d'évaporation des eaux. Les écoulements de base proviennent des réservoirs superficiels de subsurface.

L'outil isotopique apparaît ainsi adapté, mais ne pourra être exploité à sa pleine mesure du fait du faible nombre d'analyses.

À retenir

On retient la très faible connexion entre les réservoirs souterrains profonds et le réseau hydrographique. Les écoulements de surface sont composés de ruissellement rapide et d'écoulement souterrain superficiel. Ces résultats sont en accord avec les observations hydrodynamiques faites précédemment (cf. chapitre III). Les espèces chimiques C.E., Si, Ca, Na, HCO₃, Sr et Ba apparaissent être les meilleurs traceurs de ces deux compartiments de l'écoulement.

Toutes ces informations serviront d'hypothèses de base à la modélisation hydrogéochimique.

V- DÉCONVOLUTION HYDROCHIMIQUE

V.1- Objectifs

Une fois le fonctionnement hydrologique et hydrogéochimique du bassin connu, il s'agit ici de quantifier la part respective de chaque composante de l'écoulement de surface à travers une modélisation fondée sur la déconvolution des hydrogrammes. Plusieurs approches : modélisation hydrologique (Müller *et al.*, 2003 ; Carluet et De Marsily, 2004), hydrodynamique (Roche, 1986 ; Mahé *et al.*, 2000), isotopique (Bariac *et al.*, 1995 ; Carey et Quinton, 2005) et chimique (Boeglin et Tardy 1997 ; Gremillion *et al.*, 2000 ; Cook *et al.*, 2003 ; Fette *et al.*, 2005) ont déjà été utilisées dans des situations spécifiques. Dans ce paragraphe, seules les méthodes chimiques seront décrites.

La déconvolution des hydrogrammes est réalisée dans un premier temps sur la base des trois évènements de crue échantillonnés en 2003. À cette échelle événementielle, plusieurs traceurs seront testés individuellement. Dans un second temps, la déconvolution est effectuée sur la base de chroniques de C.E. enregistrées en 2003 et 2004 à la station de Donga-Kolo.

V.2- Approche méthodologique

Le principe fondamental est la conception d'un modèle de mélange d'eaux 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 et Q_l la contribution de l'écoulement lent (flux de subsurface). Ces deux composantes sont donc les inconnues du modèle. Sur la base des deux compartiments de l'écoulement, un seul traceur chimique i est requis pour la simulation.

$$\begin{aligned} \text{Éq. 6} \quad Q_t &= Q_r + Q_l \\ Q_t \times C_t^i(t) &= Q_r \times C_r^i + Q_l \times C_l^i \end{aligned}$$

C_t^i , C_r^i et C_l^i sont respectivement la concentration du traceur i à l'exutoire à la date t , la concentration du traceur i dans le ruissellement rapide et la concentration du traceur i dans l'écoulement lent. La résolution combinée des 2 équations précédentes revient à la résolution matricielle suivante :

$$\text{Éq. 7} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ C_r^i & C_l^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_r \\ Q_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_t \\ C_l^i \times Q_t \end{pmatrix}$$

La variation de la charge hydraulique dans les rivières s'accompagne très souvent de la variation des compositions chimiques de l'eau (Appelo et Postma, 1999). Cette variation est donc utilisée comme traceur pour caractériser les composantes de l'écoulement et quantifier les échanges entre les réservoirs souterrains et les rivières du bassin versant (Gregory et Walling, 1973). Les débits engendrés par les compartiments à considérer dans le modèle de mélange seront donc calculés à la fois à partir du débit total et de la composition chimique à la section de rivière à chaque instant considéré et de la composition chimique de chacune de ces composantes. Pour cela, l'application du modèle doit répondre à diverses hypothèses :

- a) La teneur du traceur chimique dans l'épisode pluvieux considéré doit être significativement différente de celle de la rivière avant l'évènement pluvieux (Crouzet *et al.*, 1970),
- b) La teneur du traceur chimique de l'averse ne présente pas de variations spatio-temporelles (Sklash et Farvolden, 1982),
- c) La composition chimique des réservoirs souterrains reste constante au cours de la crue (Sklash et Farvolden, 1982),
- d) La composition chimique des écoulements de base est significativement proche de celle des eaux souterraines (Sklash et Farvolden, 1982).

Dans la pratique, la satisfaction des hypothèses n'est pas toujours chose aisée pour plusieurs raisons. Dans le cadre de cette étude, l'hypothèse a) est très bien applicable au regard de la grande différence entre les eaux de pluie et les débits de base. Mais son application reste problématique par rapport aux isotopes stables de l'eau du fait de la grande variabilité isotopiques des précipitations et de l'homogénéité des réservoirs souterrains, d'où l'élimination de la méthode isotopique. L'hypothèse b) est également remise en cause pour les isotopes mais acceptable pour la chimie. On observe un fort appauvrissement isotopique des pluies au cours du temps (Dansgaard, 1964 ; Jouzel, 1986 ; McDonnell *et al.*, 1990 ; Kendall et McDonnell, 1993) tandis que la composition chimique tend à se stabiliser. L'hypothèse c) stipule la constance des signatures des réservoirs souterrains lors de la crue alors que celles-ci

seraient sous l'influence des eaux de recharge au cours de l'averse. Mais ce phénomène est rarement mis en évidence dans la littérature (Hooper et Shoemaker, 1986). L'hypothèse d) est généralement justifiée dans la mesure où le réservoir qui soutient le débit de base de la rivière n'offre pas de discontinuité géochimique (Bariac *et al.*, 1995). Mais dans notre contexte, cette hypothèse n'est pas vérifiée pour les réservoirs profonds d'altérite et de socle. Les signatures chimiques des débits de base sont très distinctes de celles des nappes profondes (Kamagaté *et al.*, 2005). Elle est cependant applicable pour les eaux de subsurface peu minéralisées.

V.3- Choix des traceurs et validation du modèle de mélange

La C.E. apparaît être le meilleur traceur intégrateur géochimique des compartiments contributeurs aux écoulements de surface, du fait des écarts entre les valeurs caractéristiques des différents réservoirs étudiés. Cependant le modèle de mélange que constitue l'écoulement total est confrontée à la définition du pôle souterrain. Les valeurs observées à des profondeurs comprises entre 10 et 20 m ne sont jamais mesurées dans les rivières. Mais partant des observations précédentes (cf. chapitre IV.2.4) et de l'hypothèse que les écoulements de base sont essentiellement d'origine souterraine, les caractéristiques de la composante souterraine sont approchées par des valeurs proches des écoulements de base.

- C_r = C.E. des pluies,
- C_l = C.E. des écoulements de base à chacune des 3 stations.

Sur la base de cette définition par défaut du pôle souterrain et de l'hypothèse hydrodynamique d'une contribution quasi inexistante du profond (donc modèle à deux pôles), les C.E. moyennes caractéristiques du compartiment souterrain à chaque station limnimétrique (représenté par les écoulements de base) et du ruissellement rapide (représenté par la pluie) à intégrer dans le modèle, ont été calculées (tableau 19).

Compartiments	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)
pluie (n = 14)	10,5 \pm 2,0
Écoulement de base_Ara-Pont (n = 14)	38,1 \pm 3,6
Écoulement de base_Donga-Kolo (n = 12)	54,6 \pm 6,3
Écoulement de base_Donga-Pont (n = 14)	65,0 \pm 5,6

Tableau 19 : C.E. caractéristiques (moyenne et écart-type) des compartiments.

Outre la C.E., certaines espèces chimiques majeurs dissoutes apparaissent bien indiquées pour le traçage des compartiments de l'écoulement total. L'analyse des relations entre les éléments chimiques majeurs a permis d'identifier Si, Ca, Na et HCO_3 comme éléments de discrimination des différents réservoirs (cf. chapitre IV.2.4). Ces rapports ont également permis de retenir que les crues sont de façon générale, un mélange :

- entre les précipitations et une composante souterraine dont les caractéristiques sont très proches des eaux prélevées à moins de 2 m à la station Amont du site expérimental pour la crue 1 (C_r = concentration moyenne des pluies et C_l = concentration moyenne à 2 m à la station Amont),
- entre les précipitations et les écoulements de base pour les crues 2 et 3 (C_r = concentration moyenne des pluies et C_l = concentration moyenne des écoulements de base).

Pour les éléments traces, seuls Sr et Ba apparaissent les mieux indiqués pour une décomposition à deux composantes du fait d'une différenciation nette entre les compartiments. Les rapports entre Sr et Ba ont montré que :

- pour les stations d'Ara-Pont et Donga-Kolo, les crues sont constituées d'un mélange entre la pluie et une composante souterraine dont les caractéristiques sont proches de celles des écoulements de base. Ceci est valable pour la crue 3 à Donga-Pont (C_r = concentration moyenne des pluies et C_l = concentration moyenne des écoulements de base à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont pour la crue 3 uniquement),
- les crues 1 et 2 à Donga-Pont constituent un mélange entre la pluie et les eaux de 2 m de profondeur de la station Aval (C_r = concentration moyenne des pluies et C_l = concentration moyenne à 2 m à la station Aval).

Les valeurs spécifiques caractéristiques de chaque composante ont été calculées pour chacune des stations hydrométriques et pour chacune des crues (annexes 50 et 51). Ces valeurs caractéristiques servent donc de données d'entrée du modèle.

V.4- Résultats

Les résultats de la déconvolution des hydrogrammes sont présentés dans un premier temps à l'échelle de l'évènement de crue et dans un second temps à l'échelle des chroniques de C.E. (mesure C.E. HYDREKA-Greenspan à Donga-Kolo) décrites précédemment (IV.2.3.6.2.2, figure 105).

V.4.1- Échelle de l'évènement de crue

Pour la crue 1, à titre de rappel, seules les stations d'Ara-Pont et Donga-Pont sont concernées. La contribution du souterrain superficiel représenté par les écoulements lents (Q_l) apparaît très variable selon le traceur choisi. Pour Ara-Pont, les contributions importantes de ce compartiment proviennent des simulations basées sur les traceurs Si, HCO_3 , Sr et Ba ; C.E. et Na ne fournissent pas de résultats cohérents avec le reste (fig. 134). Les flux lents correspondent à un débit maximal toujours inférieur à $12 \text{ m}^3/\text{s}$, tous traceurs confondus, tandis que le pic de l'hydrogramme total est d'environ $37 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour Donga-Pont, seule la simulation avec Na et Sr semble afficher un résultat singulier par rapport à l'ensemble. Cette particularité se manifeste par des débits plus faibles. Les autres traceurs fournissent des débits lents allant de 20 à environ $80 \text{ m}^3/\text{s}$ contre un débit total variant entre 20 et $135 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 135).

La crue 2, suivie seulement à Donga-Pont n'est pas déconvoluée pour Sr et Ba du fait du très faible nombre d'analyses. Les résultats concernent C.E., Si Ca, HCO_3 et Na. L'incohérence des résultats vient toujours de Na (fig. 136). Les débits simulés, générés par le réservoir de subsurface fluctuent fortement, mais la valeur maximale est généralement inférieure à $90 \text{ m}^3/\text{s}$ contre environ $120 \text{ m}^3/\text{s}$ comme pic total.

La crue 3 est suivie aux trois stations limnimétriques. Les résultats semblent cohérents pour tous les traceurs à Ara-Pont où le début de la crue n'a pas été suivi. L'écoulement lent, globalement inférieur à $2 \text{ m}^3/\text{s}$, est maximal au cœur de l'évènement alors qu'il apparaît être la composante essentielle de l'écoulement total en fin de crue (fig. 137). Il en est de même à Dong-Kolo. Mais là, le pic de l'écoulement lent semble précéder celui de l'hydrogramme total (fig. 138). L'hydrogramme total à Donga-Pont est symptomatique d'une crue composée de deux évènements, mais tronquée du fait de l'absence du début de l'évènement. Les fluctuations du débit lent apparaissent identiques à celles du débit total avec un maximum de l'ordre de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ observable avec la C.E. (fig. 139).

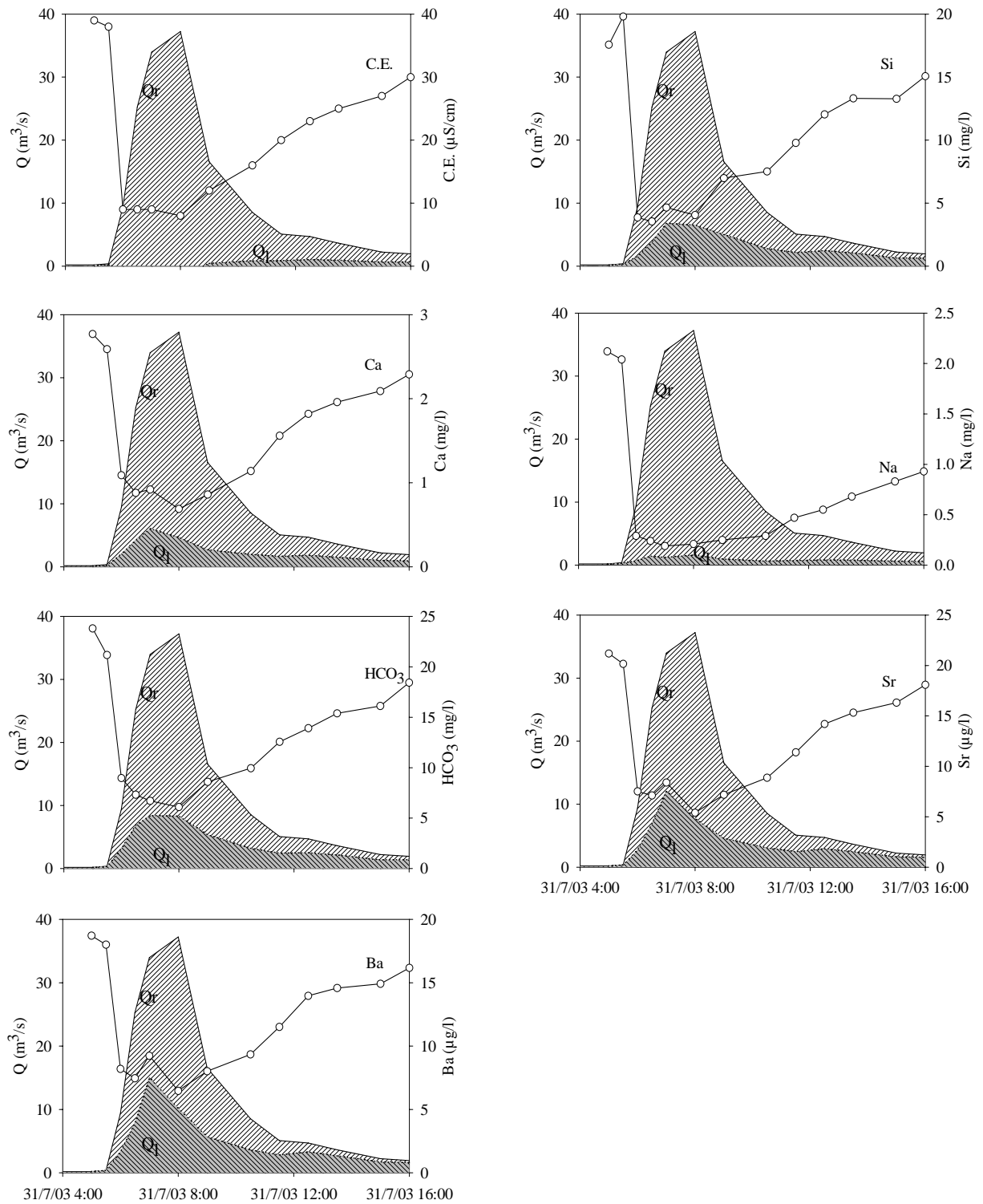


Figure 134 : Résultat de la déconvolution de la crue 1 à Ara-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.

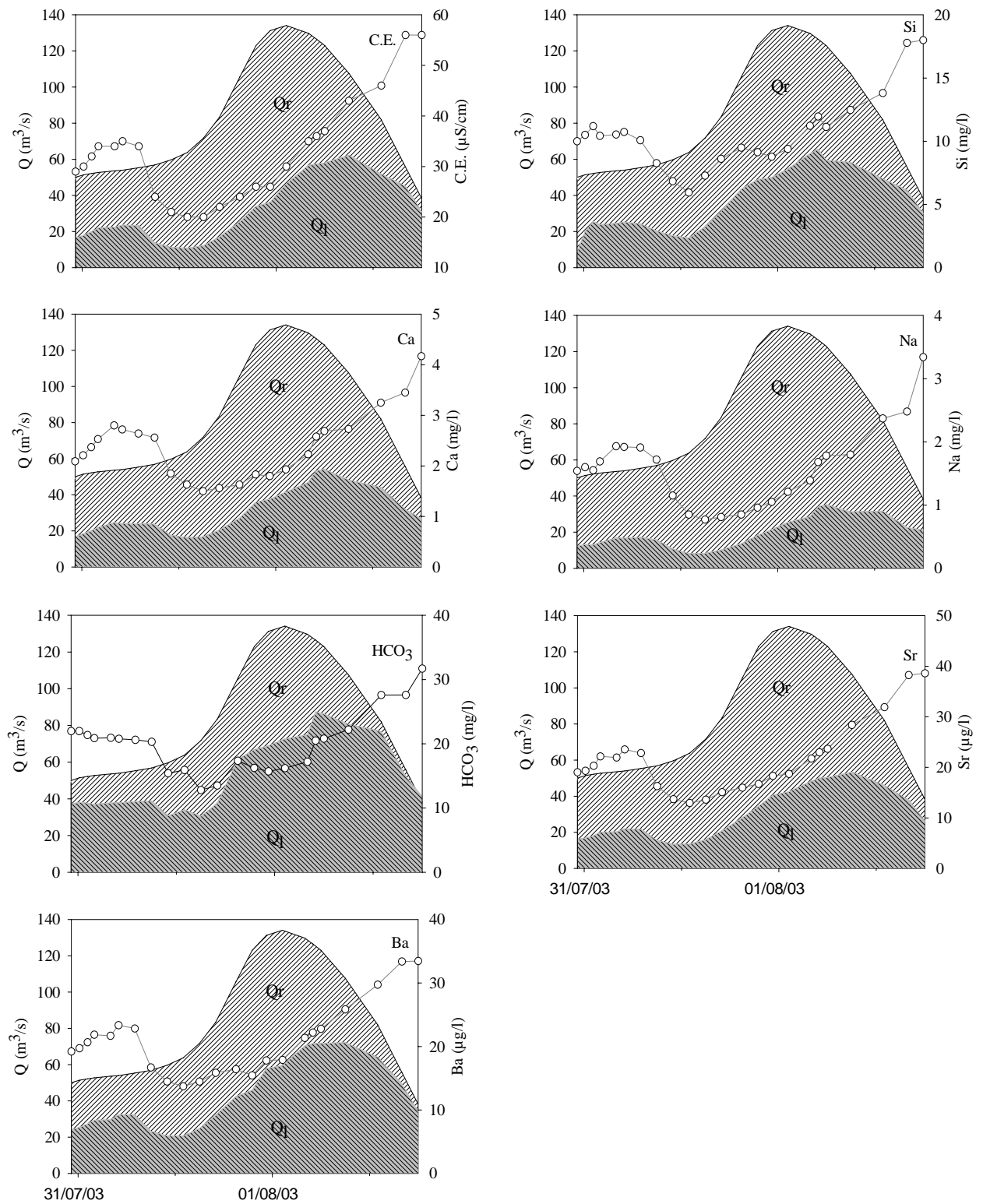


Figure 135 : Résultat de la déconvolution de la crue 1 à Donga-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.

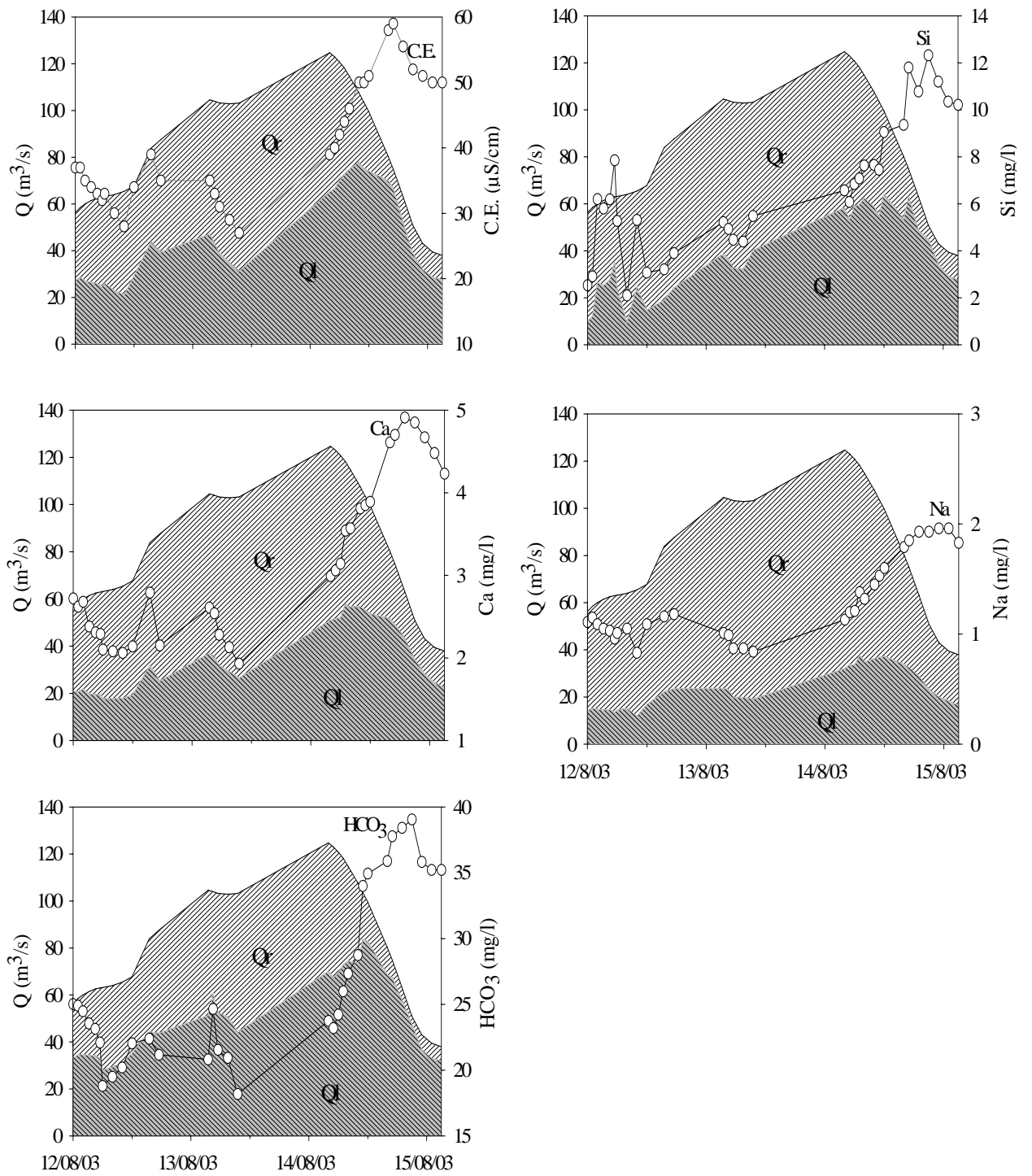


Figure 136 : Résultat de la déconvolution de la crue 2 à Donga-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.

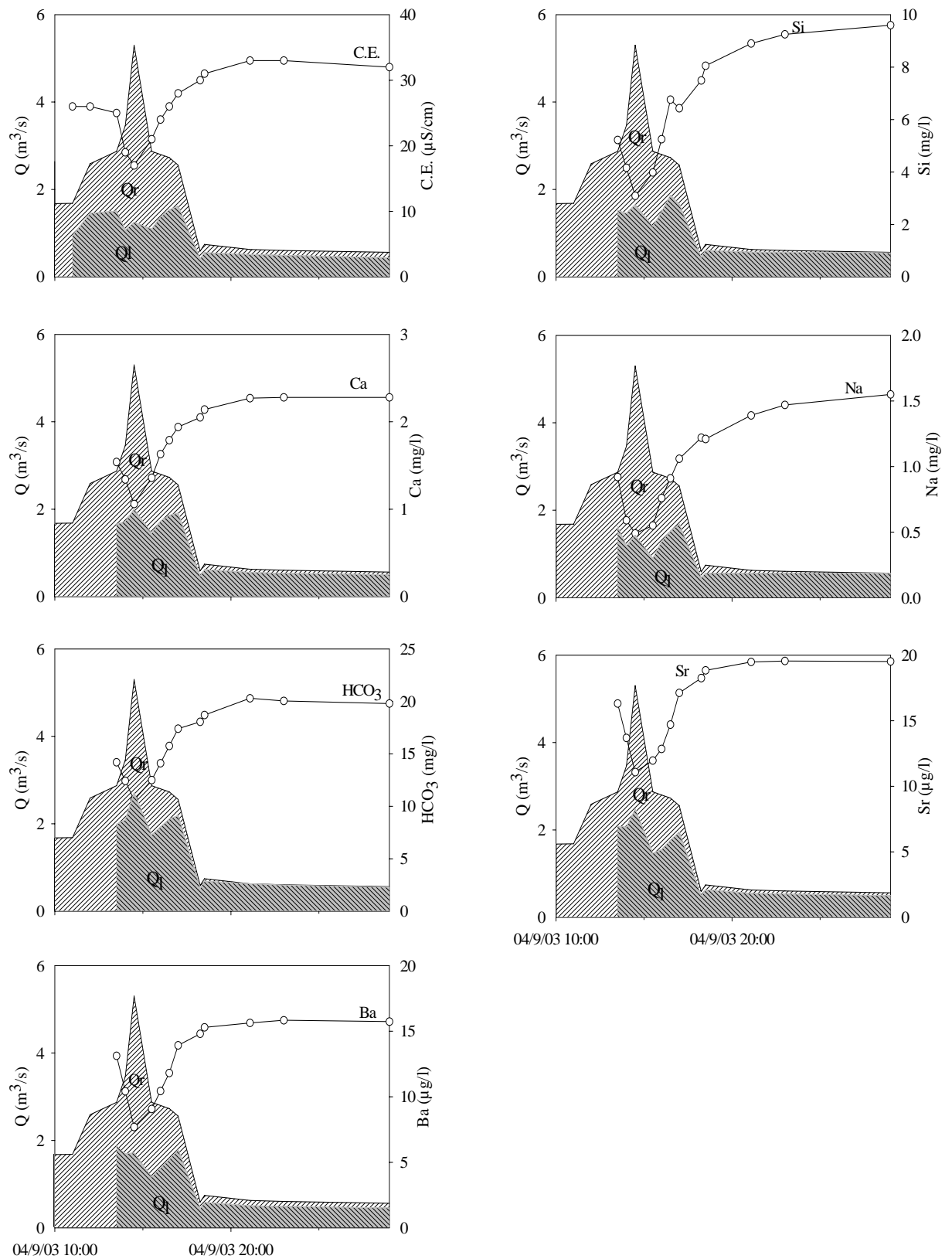


Figure 137 : Résultat de la déconvolution de la crue 3 à Ara-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.

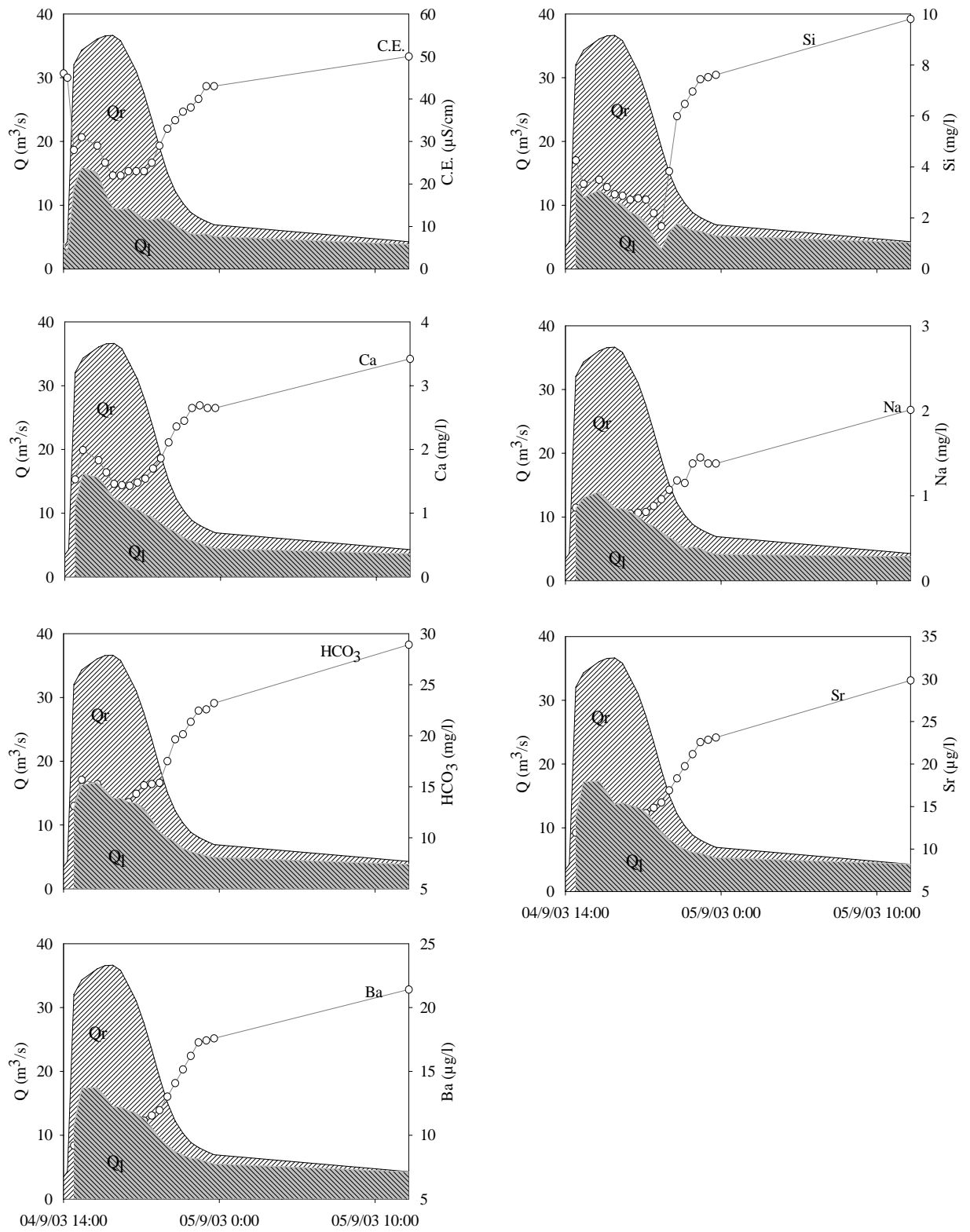


Figure 138 : Résultat de la déconvolution de la crue 3 à Donga-Kolo en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.

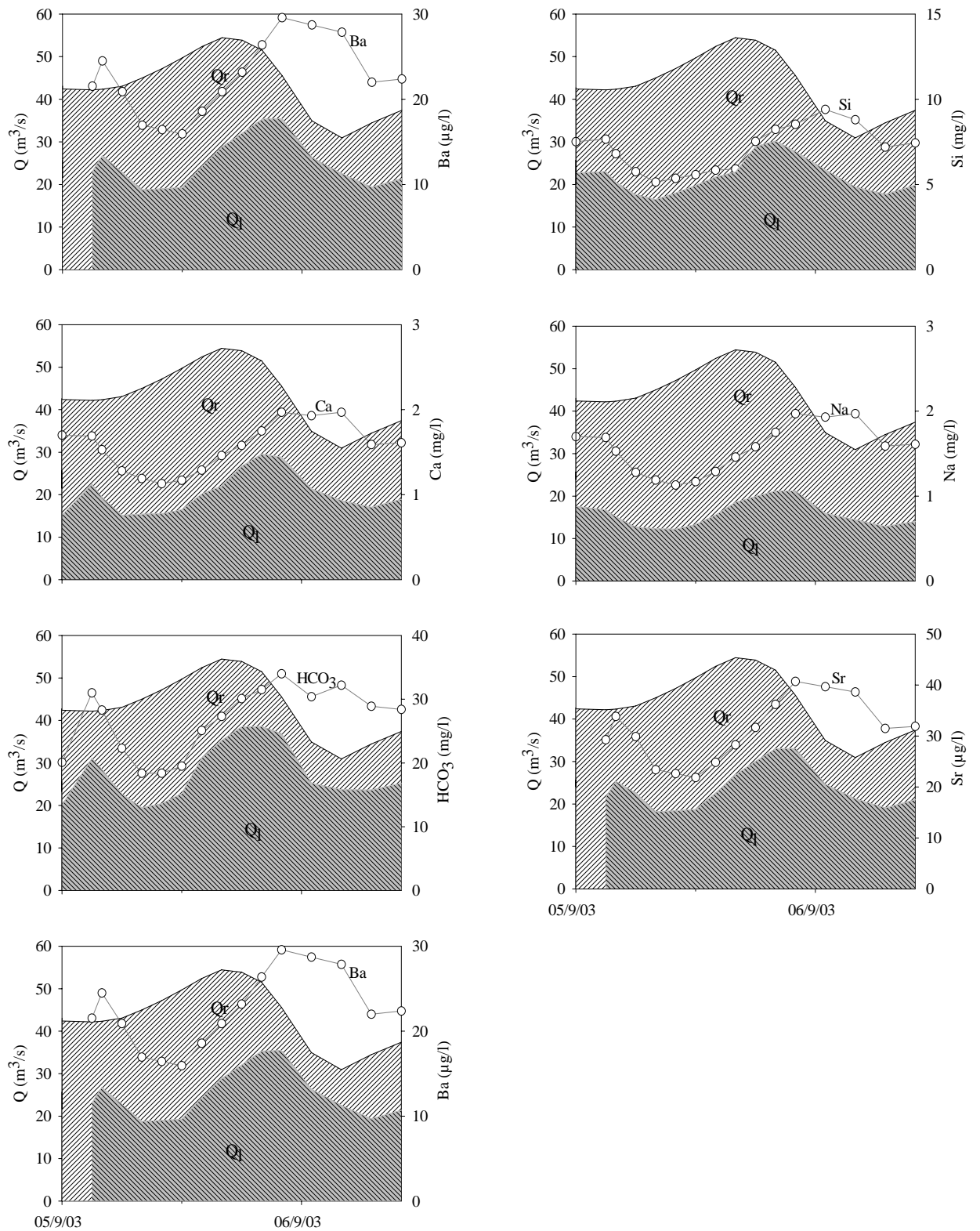


Figure 139 : Résultat de la déconvolution de la crue 3 à Donga-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.

V.4.2- Échelle des chroniques

Seule la station de Donga-Kolo a fait l'objet de mesure en continu de la conductivité électrique en 2003 et 2004. Aucun suivi à long terme des éléments chimiques dissous n'a été réalisé. La déconvolution des hydrogrammes est donc basée uniquement sur les chroniques de C.E.

Hors période de crue, le débit est toujours inférieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ et $5 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement en 2003 et 2004 pour des C.E. généralement supérieures à $50 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 140 et 141). Ce débit semble tout logiquement composé essentiellement de flux de subsurface dont les apports simulés varient entre 8 et $10 \text{ m}^3/\text{s}$. En période de crue, une hausse simultanée des débits total et lent a lieu mais contrairement à la période hors crue, l'écart entre ces deux composantes est plus important. Mais pendant cette période de crue, des débits lents simulés supérieurs au débit total apparaissent et sont ininterprétables. Ils proviendraient de conductivités dans la rivière supérieures à la valeur du pôle souterrain. Comme expliqué dans la caractérisation hydrochimique des crues (IV.2.3.6.2), ce phénomène pourraient être le fait des artefacts liés à des petites crues, insuffisamment fortes pour évacuer les matières en suspension qui provoquent une hausse anormale de la C.E.. Toutes ces observations sont nettement visibles pour 2003 alors que pour 2004, les simulations apparaissent moins bonnes.

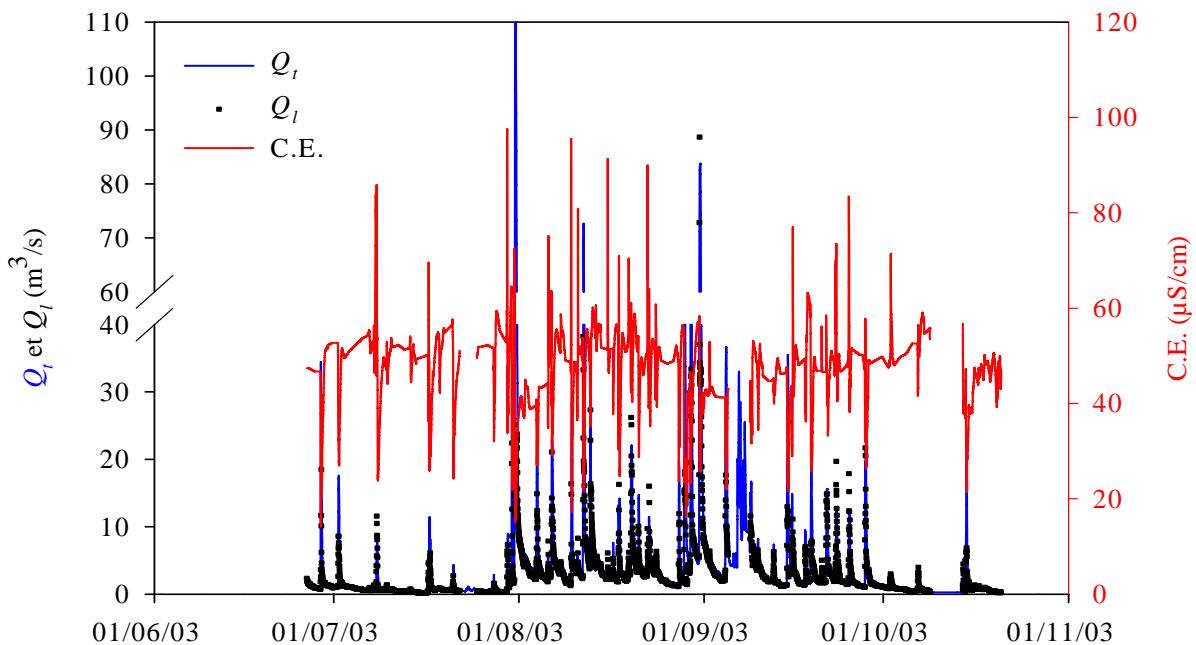


Figure 140 : Écoulement total mesuré (Q_t) et contributions moyennes des réservoirs superficiels simulées (Q_l) à partir de la C.E. à Donga-Kolo pour l'année 2003.

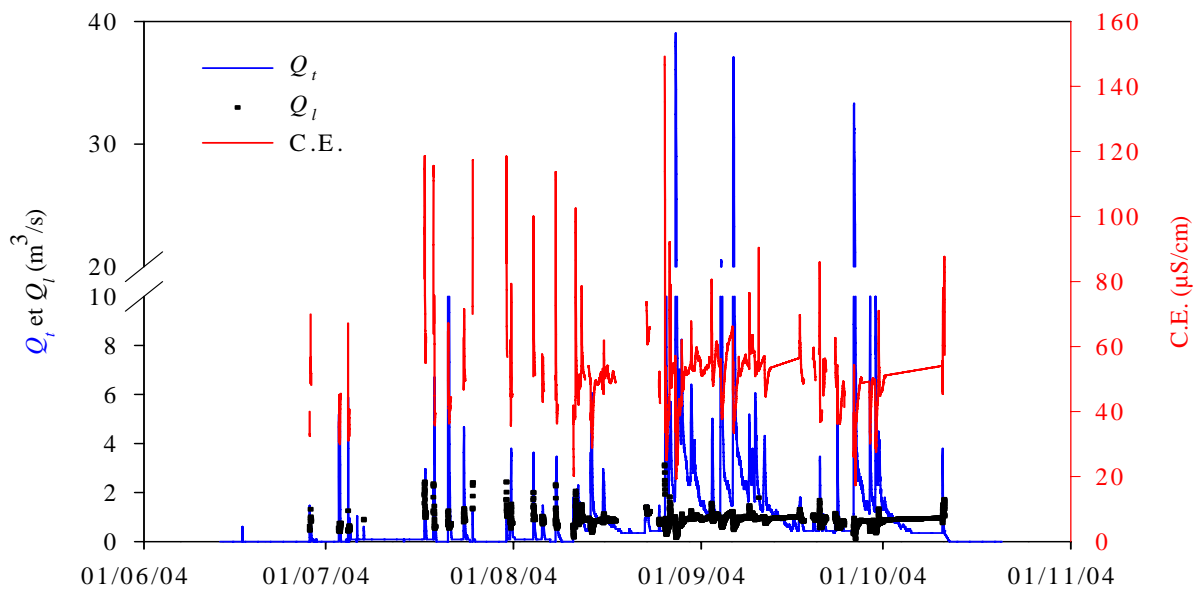


Figure 141 : Écoulement total mesuré (Q_t) et contributions moyennes des réservoirs superficiels simulées (Q_i) à partir de la C.E. à Donga-Kolo pour l'année 2004.

V.5- Incertitudes et validation des résultats

La déconvolution des hydrogrammes, outre la quantification des contributions des compartiments à l'écoulement, permet de comprendre et d'émettre des hypothèses sur le fonctionnement hydrologique du bassin. Cependant la confiance que l'on peut accorder aux calculs du modèle appelle à une évaluation des incertitudes sur les résultats. Plusieurs sources d'erreurs peuvent affecter ces résultats :

- la variation spatio-temporelle de la composition chimique dans chacun des réservoirs est une importante source d'imprécision dans le calcul de déconvolution. 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.

Les résultats obtenus doivent donc être considérés avec prudence et l'on ne doit tenir compte que des ordres de grandeur. Mais pour réduire au mieux l'effet des incertitudes sur les résultats, un test basé d'une part sur le choix des traceurs et d'autre part sur les valeurs moyennes et écart-types caractéristiques des pôles est réalisé :

- la première approche concerne uniquement les événements de crue dont la déconvolution s'est faite à partir de plusieurs traceurs. Il s'agit de faire la moyenne des contributions obtenues à partir de l'ensemble des traceurs. Les simulations qui ne paraissent pas homogènes avec l'ensemble des résultats comme indiqué précédemment (en occurrence les simulations basées sur le traceur Na) ne sont pas prises en compte dans le calcul de moyenne,
- la deuxième approche, appliquée aussi bien sur les crues que sur les chroniques, se fonde sur la méthode de Monte Carlo. Cette méthode a déjà été utilisée par Joerin *et al.* (2002) pour discuter des incertitudes sur les résultats de la déconvolution des hydrogrammes. Elle consiste à introduire au fur et à mesure dans le modèle une valeur caractéristique des pôles, obtenue d'un jeu de tirage aléatoire dans des lois normales de moyenne et écart-type précédemment donnés. Ici le tirage est répété 200 fois et ainsi à un instant donné on dispose de 200 contributions possibles par réservoir. Ensuite nous calculons la valeur moyenne et l'écart type des 200 contributions de chacun des réservoirs à cet instant. En sortie on obtient les variations temporelles de chacune des contributions ainsi que leur intervalle de confiance.

V.5.1- Échelle de l'évènement de crue

Notre travail a le mérite d'utiliser plusieurs traceurs chimiques à la fois pour les crues. Ceci a permis de s'apercevoir de la diversité de résultats possibles que l'on peut acquérir du modèle de mélange. La figure 142 montre le faisceau décrivant l'ensemble des fluctuations des contributions du réservoir de subsurface obtenue à partir des 7 traceurs (C.E., Si, Ca, Na, HCO₃, Sr et Ba) pour chacune des crues échantillonnées et des stations considérées. On retient dans l'ensemble une grande variabilité de résultats de la simulation.

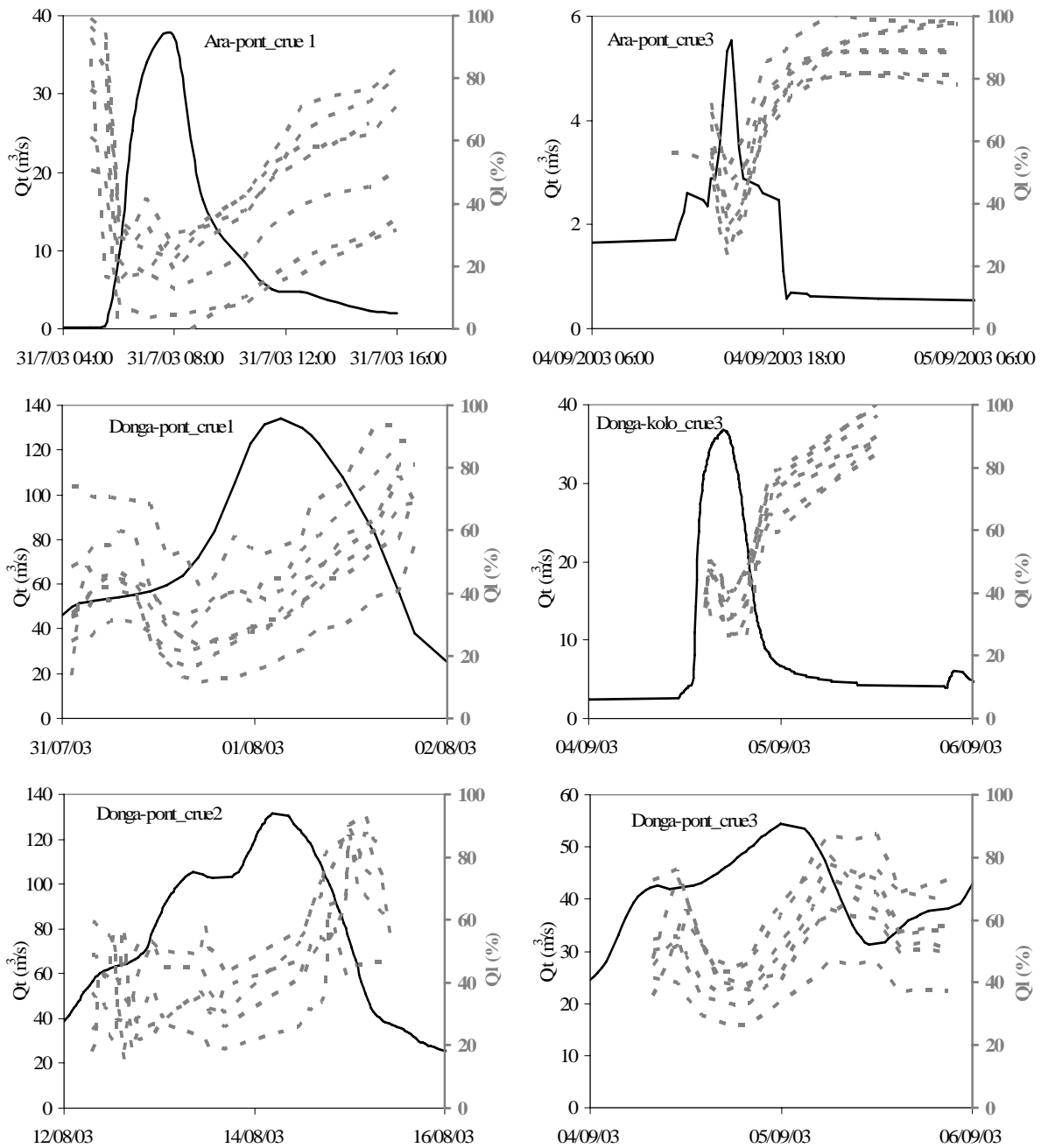


Figure 142 : Contributions du réservoir de subsurface (en pointillés) simulées à partir des traceurs retenus, pour chacune des crues échantillonnées à chaque station.

Sur la base donc des 6 simulations (celle de Na n'est pas prise en compte), nous avons adopté la première approche de calcul des incertitudes décrite précédemment en calculant une contribution moyenne et un écart-type de l'écoulement lent pour chacune des crues (tableau 20). La moyenne des contributions et les gammes d'incertitudes par la méthode de Monte Carlo ont également été calculées pour les traceurs. Du fait que les résultats apparaissent comparables, nous n'indiquons que les valeurs obtenues avec le traceur Ca qui

apparaissent les plus proches des moyennes obtenues à partir de l'ensemble des traceurs. Les deux résultats apparaissent très comparables, mais la moyenne par Monte Carlo est relativement plus faible.

En dehors de la crue 1 à Ara-Pont, la proportion de l'écoulement lent de subsurface apparaît toujours plus importante en période de crue. Aussi pour un même évènement, une contribution de plus en plus importante de l'amont vers l'aval du bassin envisageable n'est pas clairement observée.

Station	Évènement	Volume total drainé (m ³)	Contribution des écoulements lents (%)	
			Incertitude sur le choix traceurs : moyenne des contributions obtenues par plusieurs traceurs	Incertitude sur les valeurs moyennes des pôles : Monte Carlo sur le traceur Ca
Ara-pont	crue 1	130.730	30 ± 8	25 ± 6
	crue 3	20.460	64 ± 8	57 ± 7
Donga-kolo	crue 3	184.500	76 ± 6	69 ± 6
Donga-pont	crue 1	1.640.000	56 ± 13	54 ± 7
	crue 2	3.025.000	52 ± 8	49 ± 8
	crue 3	390.000	63 ± 11	60 ± 6

Tableau 20 : Récapitulatif des volumes totaux transités par les sections des rivières lors des crues échantillonnées et des apports des réservoirs superficiels (écoulement lent) à l'écoulement total.

V.5.2- Échelle des chroniques

Pour les séries longues, le calcul des incertitudes porte uniquement sur les concentrations moyennes caractéristiques des pôles (Monte Carlo) du fait de l'unicité du traceur (C.E.). Les contributions moyennes (avec l'écart-type) calculées à partir des 200 contributions simulées à chaque instant (tirages de valeurs entre la moyenne et l'écart-type) sont calculées. Les figure 143 et 144 montrent les variations à long terme des contributions (en pourcentage) de l'écoulement plus ou moins l'écart-type. Ces contributions varient de moins de 50 % à plus de 100 % aussi bien en 2003 qu'en 2004.

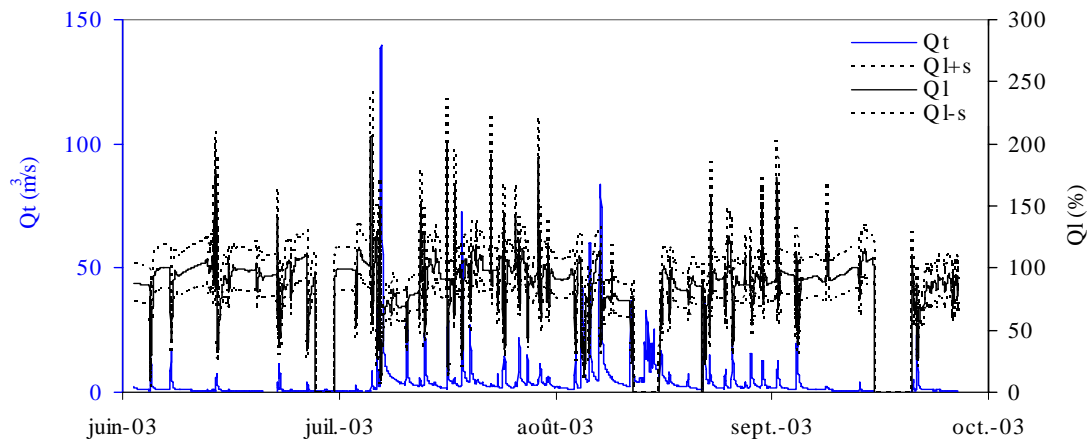


Figure 143 : Gamme d'incertitude et contribution moyenne des réservoirs superficiels (Q_I) à l'écoulement total (Q_t) en 2003.

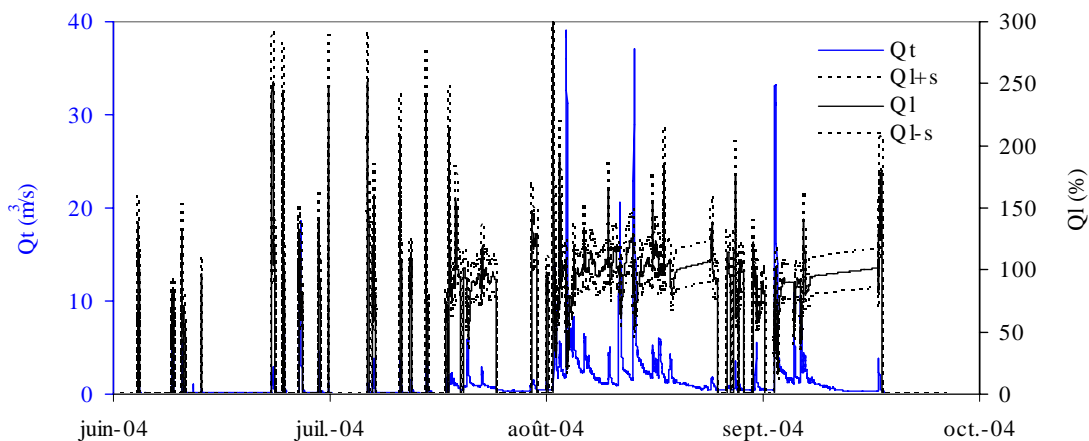


Figure 144 : Gamme d'incertitude et contribution moyenne des réservoirs superficiels (Q_I) à l'écoulement total (Q_t) en 2004.

Comme indiqué précédemment, les proportions supérieures à 100 % sont ici celles obtenues sur la base des C.E. de la rivière supérieures à celles du pôle souterrain. Pour le modèle de mélange, les débits correspondant à ces C.E. ne seront pas pris en compte. L'ensemble de ces débits est considéré comme des lacunes. Avec les débits sans C.E., ces lacunes sont évaluées et retirées des chroniques (tableau 21). En 2003, environ 39.779.972 m³ d'eau ont transité par la section de Donga- Kolo. 36.150.348 m³, soit 90 % de ce volume total correspondent à des C.E. mesurées et ont servi à la déconvolution. 68 ± 13 % de ce volume retenu provient des réservoirs de subsurface. En 2004, le volume total évacué à la même section est d'environ 11.085.120 m³ dont 10.340.380 m³ (soit 93 %) ont servi de base à la déconvolution. 83 ± 13 % de ce volume retenu est d'origine souterraine superficielle. Le ruissellement rapide est ainsi aisément déduit. Il est estimé 32 % en 2003 et 17 % en 2004.

Année	Durée des chroniques	Volume total (m ³)	Pourcentage de débit sans C.E. (lacune)	Volume déconvolué (m ³)	Réservoir superficiel (%)
2003	26/06/03 12h 00 au 20/10/03 17 h 00	39.779.972	10	36.150.348	68 ± 13
2004	13/06/04 14 h 30 au 20/10/04 11 h 30	11.085.120	7	10.340.380	83 ± 13

Tableau 21 : Contribution annuelle des réservoirs de subsurface en 2003 et 2004.

V.6- Conclusion

En accord avec les résultats de la caractérisation hydrologique et hydrogéochimique des réservoirs hydriques, une déconvolution des hydrogrammes de 2003 et 2004 en deux écoulements (ruissellement et flux de subsurface) a été réalisée. Pour tenir compte de l'incertitude sur les résultats, un test sur le choix des traceurs et une simulation réalisée par la méthode de Monte Carlo ont été menés. Les flux de subsurface représentent la part importante de l'écoulement de surface (fig. 145). Mais la plus forte contribution est observée en 2004 en accord avec le contraste pluviométrique des deux années. Ces résultats suggèrent en outre que la variabilité des écoulements n'a pas une origine unique, mais résulte d'un déficit combiné des flux de surface et de sub-surface.

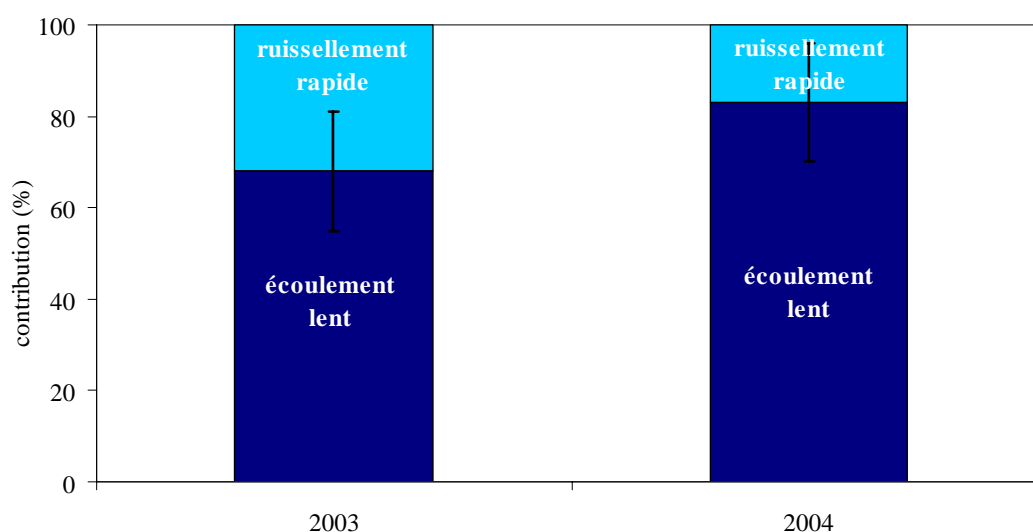


Figure 145 : Contribution annuelle du ruissellement rapide et de l'écoulement lent à l'écoulement total à Donga-Kolo en 2003 et 2004 (écart-type de 13 %).

VI- SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE

VI.1- Fonctionnement hydrologique

Pour des pluies de même saisonnalité, le cumul pluviométrique diminue de 24 %, de l'année humide (2003) aux années sèches (2002 et 2004). Cette différence se retrouve dans les écoulements de surface à l'exutoire avec des coefficients d'écoulement variant du double (29 %) au simple (14 %) de 2003 à 2004 (vice versa de 2002 à 2003). Les mêmes conclusions peuvent être apportées pour les sous-bassins emboîtés d'Ara et Donga-Kolo.

Les profondeurs de la nappe libre sont comprises en moyenne entre 10 m en saison sèche et 3 m en saison humide. Le niveau piézométrique est toujours en position haute par rapport à l'axe de drainage le plus proche sur l'ensemble du bassin. Cette observation est également valable à une échelle de plus fine investigation (versant expérimental) où les piézomètres crépinés à 10 et 20 m montrent une même piézométrie (nappe phréatique pérenne des altérites) tandis que ceux crépinés à 2 m captent un niveau saturé à potentiel plus élevé (nappe perchée temporaire). Le maximum piézométrique de la nappe phréatique est atteint en août-septembre, après une hausse plurimétrique des niveaux sans répartition particulière des amplitudes de fluctuation sur le bassin. De même que les écoulements de surface, la décrue piézométrique s'amorce dès la fin de la saison pluvieuse pour atteindre un minimum en mai-juin. Mais le tarissement total des rivières du bassin est observé au moment où la nappe est encore en position très haute.

Au terme de cette caractérisation, un bilan hydrologique a été établi sur la base des différents termes caractérisés (pluie, recharge, ETP, écoulement). Un déficit d'écoulement important (70 à 85 % de la pluie annuelle), imputable d'une part à l'évapotranspiration et d'autre part au stockage annuel dans l'aquifère et probablement aux flux piégés par les fractures fermées en profondeur.

VI.2- Fonctionnement hydrogéochimique

Les précipitations sont très faiblement minéralisées avec un faciès chimique chloruré calco-magnésien. Elles présentent une grande variabilité isotopique. Ces eaux de pluie alimentent la nappe phréatique qui, avec un faciès bicarbonaté calco-magnésien, présente une minéralisation relativement faible du fait de la nature silicatée des formations traversées. Contrairement aux précipitations, la nappe offre une signature isotopique relativement homogène. Les eaux de surface montrent une minéralisation encore plus faible, davantage proche de celle des eaux souterraines superficielles plutôt que de la nappe profonde contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre. La signature chimiques des écoulements

fluctue en cours de crue : à une chute des teneurs en début d'hydrogramme, succède un recouvrement progressif des valeurs initiales. La variabilité isotopique des précipitations se retrouve dans les écoulements de surface. Aucun processus d'évaporation d'eau n'est observé pour tous les réservoirs. La C.E. et les espèces chimiques dissous Si, Ca, Na et HCO_3 sont les paramètres distinctifs des compartiments hydriques étudiés.

VI.3- Synthèse des résultats

Le croisement de toutes les informations hydrologique et hydrogéochimique a permis de reconstituer un schéma cohérent des processus mis en jeu sur le bassin. Le caractère temporaire des eaux de surface, l'asynchronisme entre le tarissement des rivières et la vidange des nappes ainsi que la très faible minéralisation des écoulements traduisent une origine superficielle des débits et une déconnexion apparente de la nappe libre du réseau hydrographique. L'existence d'une nappe perchée saisonnière reliée à l'observation d'émergences d'écoulements de sub-surface en de multiples points du bassin en saison pluvieuse conforte ce fonctionnement. Le débit des cours d'eau est donc composé d'un flux rapide (ruissellement) et d'un flux retardé de sub-surface (nappe perchée saisonnière), sans contribution significative de la nappe des altérites. La vidange de la nappe libre semble donc s'effectuer essentiellement par des transferts verticaux, par évapotranspiration (strate arborée) et plus localement, vers des fractures du socle en profondeur.

En accord avec ce processus mis en évidence, une déconvolution de l'hydrogramme à Donga-Kolo en deux composantes (ruissellement rapide sur surface saturée et flux de subsurface) a été retenue pour les années 2003 et 2004. Les flux de subsurface représentent $68 \pm 13\%$ et $83 \pm 13\%$ de l'écoulement total, respectivement en 2003 et 2004. Ces résultats sont en accord avec le contraste pluviométrique des deux années. Ils suggèrent également que la baisse des écoulements est liée à un déficit combiné des flux de surface et de sub-surface.

VI.4- Contribution à la compréhension des processus et à l'amélioration des modèles hydrologiques

Les résultats de nos travaux constituent une première étape dans l'étude hydrologique du bassin versant de la Donga. Dans le cadre du programme AMMA, un suivi à plus long terme permettra notamment de préciser l'importance respective du ruissellement et

des écoulements de sub-surface dans la variabilité interannuelle des débits. Dans une perspective plus large, cette étude représente également une contribution à une meilleure connaissance de l'impact du déboisement et du changement d'occupation des sols sur l'hydrologie de l'Afrique sub-saharienne (Giertz et Diekkruger, 2003 ; Séguis *et al.*, 2004 ; Mahé *et al.*, 2005).

L'amélioration des connaissances des bilans d'eau terrestres et notamment l'impact sur la ressource en eau des changements climatiques et anthropiques nécessitent par ailleurs une approche pluri-disciplinaire des différents termes du bilan. Ceci est l'un des objectifs principaux du programme AMMA. La stratégie d'observation de l'ORE AMMA-Catch au Bénin se fonde en plus, sur une remarquable synergie entre expérimentalistes et modélisateurs. Le compromis entre compréhension des processus et mise en œuvre des modèles hydrologiques apparaît donc comme une approche très moderne dans le développement de modèles plus réalistes du fonctionnement des bassins versants (Seibert et McDonnell, 2002). À l'origine, le bassin versant de la Donga était très mal connu, en dehors du contexte soudanien dans lequel il se situe. L'instrumentation était moins dense qu'aujourd'hui. C'est dans ce cadre que Varado (2004) a mis en œuvre le modèle hydrologique distribué à base physique POWER, basé uniquement sur la pluviométrie, les débits et les hauteurs d'eau dans les puits villageois, sans connaissance complète des processus régissant le fonctionnement du bassin. C'est suite aux premiers résultats de nos travaux, s'appuyant à la fois sur une instrumentation densifiée de la zone (augmentation du nombre de piézomètres à l'échelle du bassin, prise en compte des forages villageois plus profonds que les puits, installation de sites expérimentaux, nivellement de tous les points de mesure) et sur l'acquisition d'un nombre important de données hydrogéochimiques, que le processus fondamental régissant le fonctionnement du bassin, à savoir la relation tenue entre le réseau hydrographique et les réservoirs profonds et l'origine très superficiel des écoulements de surface (ruissellement hortonien et sur surface saturée contributive) a été identifié.

Ces nouveaux résultats ont servi dans la modélisation hydrologique réalisée par Le Lay (2006). Celui-ci a proposé une conceptualisation basée sur un compromis entre les processus dominants et leur description mathématique pour modéliser le cycle hydrologique du bassin de la Donga sur la période 1998 à 2002. Il a formalisé la déconnexion entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines profondes dans le modèle hydrologique TOPAMMA, version modifiée de TOPMODEL basé sur un fonctionnement par développement de surfaces contributives et d'exfiltration de nappes (Beven et Kirby, 1979). À

la suite de Lelay (2006), une évaluation du réalisme de TOPAMMA sur la période 2002-2004 a été réalisée par Métadier (2006) en vue d'affiner l'appréciation des hypothèses. Métadier a également étudié l'apport sur le calage du modèle d'un critère portant sur notre rapport volume annuel exfiltré/volume écoulé total. Ceci constitue une condition supplémentaire introduite dans le calage du modèle hydrologique. L'ajout de ce critère géochimique supplémentaire a réduit l'incertitude sur les débits calculés par le modèle. Ce travail, loin d'être à notre actif, est donc le fruit d'un travail d'équipe.

VI.5- Perspectives

Les perspectives à envisager, outre le suivi à long terme des caractéristiques hydrodynamiques et hydrogéochimiques des réservoirs hydriques en vue de comprendre les variabilités interannuelles des écoulements, se fondent sur la nécessaire complémentarité entre la compréhension des processus et l'amélioration des modèles hydrologiques. En effet les travaux de Métadier (2006) ont montré les limites du modèle hydrologique actuel, notamment la difficulté à simuler les premiers écoulements de la saison.

Des observations récentes montrent que le schéma actuel de nappes superficielles continues au long des versants est peut-être à amender. Tous les versants ne seraient pas fonctionnels pour alimenter les écoulements. On constate en effet peu de surfaces saturées et d'exfiltration en bas des versants au long des rivières d'ordre 2 et supérieures. En revanche, à l'amont des drains d'ordre 1, à mi-versant, des évaselements restant saturés en eau au cours de la saison des pluies sont observables. Une instrumentation spécifique à ces sites (piézomètres, suivi de l'humidité dans la zone non saturée et seuil jaugeur) démarre en 2006. La même démarche utilisée dans cette thèse devra permettre de déterminer si ces sites en relation avec les versants les entourant sont les véritables zones productives des écoulements.

Dans une perspective plus large, cette étude représente également une contribution à une meilleure connaissance de l'impact du déboisement et du changement d'occupation des sols sur l'hydrologie de la zone (Giertz *et al.* 2005). En effet un défrichement continu et d'ampleur importante provoquerait une augmentation conséquente du coefficient de ruissellement du bassin, comme mise en exergue au Niger (Casenave et Valentin, 1992). Une inversion de l'ordre d'importance des composantes de l'écoulement mise en évidence dans cette thèse pourrait alors s'en suivre. Le ruissellement direct pourrait être la composante majoritaire de l'écoulement au détriment des flux de subsurface dont la part serait de plus en plus faible. Dans ce contexte, les capacités au ruissellement augmentant, les réservoirs

souterrains du bassin pourraient être moins alimentés. *A contrario*, le défrichement pourrait également induire une diminution de l'ETR du fait d'un couvert végétal de moins en moins dense. Ceci entraînerait une plus grande alimentation des horizons profonds du sol et donc une remontée de la nappe, si le drainage profond n'évolue pas. Ceci met à la fois en exergue la nécessité de mieux connaître l'ETR sous différents couverts végétaux (forêt, culture) et de poursuivre l'étude hydrologique du bassin en vue de mieux cerner l'impact de la pression anthropique sur la ressource en eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Affaton P., 1990. Le Bassin des Voltas (Afrique de l'Ouest) : une marge passive, d'âge protérozoïque supérieur, tectonisée au panafricain (600 ± 50 Ma). Thèse Géologie, Université d'Aix-Marseille, *ORSTOM Études et Thèses*, Paris, 3, 1987, 499 p.
- Appelo C.A.J. & Postma D., 1999. Geochemistry, groundwater and pollution. A. A *BALKEMA* Rotterdam, 536 P.
- Aubouin J., Brousse R. & Lehman J.-P., 1968. Précis de géologie. *Dunod Université*, tome 3 Paris, 298 P.
- Bariac T., Millet A., Ladouche B., Mathieu R., Grimaldi C., Grimaldi M., 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., Bonnefond J. M., Tournebize R. & Granier A., 1995. Décomposition géochimique de l'hydrogramme de crue sur un petit bassin versant Guyanais (Piste Saint-Elie, dispositif ECEREX, Orstom-CTFT, Guyane Française). *IASH*, 238, 249-269.
- Beven K.J. & Kirby M.J., 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43-69.
- Boeglin J.-L. & Tardy Y., 1997. Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Découpage d'hydrogramme en quatre écoulements. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 325, 125-131.
- Bormann H., Fass B.T., Giertz S., Junge B., Dieckrüger B., Reichert B. & Skowronek A., 2005. From local hydrological process analysis to regional hydrological model application in Benin: Concept, results and perspectives. *Phys. Chem. Earth*, 30, 347-356.
- Braud I., De Condappa D., Soria J.M., Haverkamp R., Angulo-Jaramillo R., Galle S. & Vauclin M., 2004. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (Beerkan method). *Euro. J. Soil Sci.*, in press.

- Braun J.-J., Dupré B., Viers J., Ndam Ngoupayou J.R., Bedimo Bedimo J.-P., Sigha-Nkamdjou L., Freydier R., Robain H., Nyeck B., Bodin J., Oliva P., Boeglin J.-L., Stemmler S. & Berthelin J., 2002. Biogeohydrodynamic in the forested humid tropical environment: the case study of the Nsimi small experimental watershed (south Cameroon). *Bull. Soc. Geol. France*, 173, 347-357.
- BRGM/OBM, 1984. Carte géologique au 1/200 000e feuille de Djougou-Parakou-Nikki, *Office Béninois des Mines*, Cotonou, République du Bénin.
- Caissie D., Pollock T. L. & Cunjak R. A. 1996. Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin. *J. Hydrol.*, 178, 137-157.
- Carey S.K. & Quinton W.L., 2005. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment. *Hydrol. process.*, 19, 95-114.
- Carluer N. & De Marsily G., 2004. Assessment and modelling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management. *J. Hydrol.*, 285, 76-95.
- Casenave A. & Valentin C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.*, 130, 231-249.
- Chevallier P., 1990. Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro Borotou (Côte d'Ivoire). *ORSTOM Études et Thèses*, Paris, 332 P.
- Chevallier P. & Planchon O., 1993. Hydrological processes in a small humid savanna basin (Ivory Coast). *J. Hydrol.*, 151, 173-191.
- Cook P.G., Favreau G., Dighton J.C. & Tickell S., 2003. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. *J. Hydrol.*, 277, 74-88.

- Cooper H.H., Bredehoeft J.D. & Papadopoulos I.S., 1976. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resour. Res.*, 3, 263-269.
- Crosbie R.S., Binning P. & Kalma J.D., 2005. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resour. Res.* 41, 10.1029/2004WR003077.
- Crouzet E., Hubert P., Olive P. & Marcé E.S.A., 1970. Le tritium dans les mesures hydrologiques de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. *J. Hydrol.*, 11, 217-229.
- Dansgaard W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- De Marsily G., 1981. Hydrogéologie quantitative. *Masson*, 215 P.
- Descloitres M., Wubda M. & Le Troquer Y., 2003. Prospections géophysiques sur le bassin versant d'Ara : électrique 2D et électromagnétisme EM34 ; Compte-rendu de mission du 5 au 14 mai 2003, *Rapport technique IRD*, Ouagadougou, Burkina-Faso, 15 p.
- DMN, Direction de la Météorologie Nationale, 2001. Mise en forme des données pluviométriques obtenues à la station météorologique de Djougou. *Direction Générale de l'Hydraulique du Bénin*, Cotonou, Bénin.
- Faillat J.-P., 1990. Origine des nitrates dans les nappes de fissures de la zone intertropicale humide. Exemple de la Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.*, 113, 231-264.
- FAO, 1998. Crop Evaporation – Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper, Rome, 56. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- Faure P., 1977. Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000e, feuille de Djougou. *ORSTOM*, Paris, France.
- Faure P. & Volkoff B., 1998. Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). *Catena*, 32, 281-306.

- Favreau G., Leduc C. & Marlin C., 2000. Représentativité de l'échantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride. *J. Afr. Earth Sci.*, 31, 669-678.
- 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.
- Fette M., Kipfer R., Schubert C.J., Hoehn E. & Wehrli B., 2005. Assessing river-groundwater exchange in the regulated Rhone River (Switzerland) using stable isotopes and geochemical tracers. *Appli. Geochem.*, 20, 701-712.
- Filippi C., Milville F. & Thiery D., 1990. Évaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale : application à 10 sites au Burkina-Faso. *J. Sci. Hydrol.*, 35, 29-48.
- Fornis R.L., Vermeulen H.R. & Nieuwenhuis J.D., 2005. Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies. *J. Hydrol.*, 300, 20-32.
- Fournier F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. *Presses Univ.*, France, 203 p.
- Freydier R., Dupré B. & Lacaux J. P., 1998. Precipitation chemistry in intertropical Africa. *Atmos. Environ.*, 32, 749-765.
- Freydier R., Dupré B., Dandurand J.-L., Fortune J.-P. & Sigha-Nkamdjou L., 2002. Trace elements and major species in precipitation at African stations: concentrations and sources. *Bull. Soc. Géol.*, France, 173, 129-146.
- Galy-Lacaux C. & Modi A. I., 1998. Precipitation chemistry in the sahelian savana of Niger, Africa. *J. Atmos. Chem.*, 30, 319-343.
- Giertz S. & Diekkrüger B., 2003. Analysis of the hydrological processes in a small headwater catchment in Benin (West Africa). *Phys. Chem. Earth.*, 28, 1333-1341.

- Giertz S., Junge B. & Diekkrüger B., 2005. Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment of West Africa. *Phys. Chem. Earth.*, 30, 485-496.
- Gremillon P., Gonyeau A. & 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.
- Gregory K.J. & Walling D.E., 1973. Draining basin form and process - a geomorphological approach. *Edward Arnold*, London, 456 p.
- Hadjer K., Klein T. & Schopp M., 2005. Water consumption embedded in its social context, north-western Benin. *Phys. Chem. Earth*, 30, 357-364.
- 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, 84 P.
- Hooper R.P. & Shoemaker C. A., 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resour. Res.*, 22, 1444.
- Jacquin F. & Seygona Z.Y., 2004. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrodynamique des aquifères du bassin versant de la Donga. Dossiers de forages, *Rapport technique Direction Générale de l'Hydraulique du Bénin et IRD*, Cotonou, Bénin, 35 P.
- Joerin C., Beven K.J., Iorgulescu I. & Musy A., 2002. Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models. *J. Hydrol.*, 255, 90-106.
- Joseph A., Frangi J.P., Aranyossy J.F., 1992. Isotope characteristics of meteoric water and groundwater in the sahelo-sudanese zone. *J. Geophys. Res.*, 97, 7543-7551.

- Jouzel J., 1986. Isotopes in cloud physics: multiphase and multistage condensation process. In: *Handbook Envir. Isotope Geochem.* 11: The Terrestrial Environment (ed. Par Fritz P. & Fontes J.Ch.), 61, Elsevier.
- Kamagaté B., Séguis L. & Jacquin F., 2003. Mission Nivellement – Géochimie, haut-bassin de l’Ouémé (Bénin). *Rapport technique IRD Montpellier*, 9 p.
- Kamagaté B., Favreau G., Séguis L. & 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. <http://meetings.copernicus.org/egu2005/abstract>.
- KhronoStat 1.01, 1998. Logiciel d’analyse statistique de séries chronologiques, *ORSTOM*.
- Kendall C. & McDonnell J.J., 1993. Effect of intrastorm isotopic heterogeneities of rainfall, soil water and groundwater on runoff modelling. In: *Tracers in Hydrology* (ed. Par Peters N.E., Hoehn E., Leibundgut Ch., Tase N. & Walling D.E., 1993, 41-48. *IASH*, 215.
- Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y & Gualde R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la république du Bénin. *ORSTOM*, Paris, 11.
- Lebel T. & Vischel T., 2005. Climat et cycle de l’eau en zone tropicale : un problème d’échelle. *C. R. Geosci.*, 337, 29-38.
- Le Lay M. & Galle S., 2005. Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *J. Sci. Hydrol.*, 50, 509-524.
- Le Lay M., 2006. Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Thèse de doctorat, *Institut National Polytechnique de Grenoble*, 253 P.
- L’Hôte Y., Mahé G., Some B. & Triboulet J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *J. Sci. Hydrol.*, 47, 563-572.

- Mahé G. & Olivry J.C., 1999. Évaluation 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.
- Mahé G., Olivry J-C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F. & Servat E., 2000. Relation eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad. Sci.*, 330, 689-692.
- Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D. & Dezetter A., 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *J. Hydrol.*, 300, 33-43.
- Mathieu R. & Bariac, T., 1996. An isotopic study (^2H and ^{18}O) of water movements in clayey soils under a semiarid climate. *Water Resour. Res.*, 32, 779-789.
- McDonnell J.J., Bonnell M., Stewart M.K. & Pearce A.J., 1990. Deuterium variations in storm rainfall: implications for stream hydrograph separation. *Water Resour. Res.*, 26, 455-462.
- Métadier M., 2006. Bilan hydrologique du bassin versant de la Donga (zone soudanienne, centre Bénin) et d'un de ses sous-bassins par modélisation (TOPAMMA) - étude du réalisme. Master Recherche, *Université de Montpellier 2*, 93 P.
- Müller K., Deurer M., Hartmann H., Bach M., Spiteller M. & Frede H.-G., 2003. Hydrological characterisation of pesticide loads using hydrograph separation at different scales in a German catchment. *J. Hydrol.*, 273, 1-17.
- Peugeot C., Esteves M., Galle S., Rajot J.L. & Vandervaere J.P., 1997. Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the east central supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *J. hydrol.*, 188-189, 179-202.
- Picouet C., Dupré B., Orange D. & Valladon M., 2002. Major and trace element geochemistry in the upper Niger river (Mali): physical and chemical weathering rates and CO_2 consumption. *Chem. Geol.*, 185, 93-124.

- Robain H. & Wubda M., 2004. Rapport de mission au Bénin du 12 octobre au 22 novembre, *Rapport technique IRD*, 31 p.
- Rodier J., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. *ORSTOM*, Paris.
- Roche M.F., 1986. Dictionnaire français d'hydrologie de surface. *Masson*, Paris, 288 P.
- Roose E., De Noni G. & Lamachère J.-M., 1998. L'érosion : 40 ans de recherches multidisciplinaires. *ORSTOM*, Paris, 56, 2-7.
- Rose C.W., 1993. Erosion and sédimentaire. In: Bonell M., Hufschmidt M.M., Gladwell J.S. (eds), *Hydrology and Water Management in the Humid Tropic*. *Cambridge Univ. Press*, 301-343.
- Seibert J. & McDonnell J.J., 2002. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration. *Water Resour. Res.*, 38, 11, 1241.
- Séguis L., Cappelaere B., Milesi G., Peugeot C., Massuel S. & Favreau G., 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrol. Process.*, 18, 3401-3413.
- Sigg L., Stumm W. & Behra P., 1992. Chimie des milieux aquatiques : Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. *Masson*, Paris, Milan, Barcelone, Bonn, 381 P.
- Sigha-Nkamdjou L., Galy-Lacaux C., Pont V., Richard S., Sighomnou D. & Lacaux J. P., 2003. Rainwater chemistry and wet deposition over the equatorial forest ecosystem of zoétélé (Cameroon). *J. Atmos. Chem.*, 46, 173-198.
- Sklash M.G. & Farvoden R.N., 1979. The role of groundwater in the storm flow. *J. Hydrol.*, 43, 45-65.

- Sklash M.G. & Farvoden R.N., 1982. The use of environmental isotopes in the study of high-runoff episodes in streams. In: *Isotope studies Hydrol. process.* (ed. Perry Jr E.C., Montgomery W.C.), 65. Northern Illinois University press, Dekalb, Illinois.
- Sobieraj J.A., Elsenbeer H. & McClain M., 2002. The cation and silica chemistry of a Subandean river basin in western Amazonia. *Hydrol. Process.*, 16, 1353-1372.
- Tardy Y., Bustillo V. & Boeglin J.-L., 2004. Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics. A case study: the basin of the Niger River, Africa. *Appl. Geochem.*, 19, 469-518.
- Taupin J.D., Gallaire R. & Arnaud Y., 1997. Analyses isotopiques et chimiques des précipitations sahéliennes de la région de Niamey au Niger : implications climatologiques. in: *Hydrochem., Rabat symposium AISH.*, 244, 151-162.
- Taupin J.D., Coudrain-Ribstein A., Gallaire R., Zuppi G.M. & Filly A., 2000. Rainfall characteristics ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ΔT and ΔH_r) in western Africa, regional scale and influence of irrigated areas. *J. Geophys. Res.*, 105, 11911-11924.
- Taupin J.D., Gaëlle G., Favreau G., Leduc C & Marlin C., 2002. Variabilité isotopique des précipitations sahéliennes à différentes échelle de temps à Niamey (Niger) entre 1992 et 1999 (implication climatique). *C.R. Géos.*, 334, 43-50.
- Thevenot N., Boukraoui S., Arjounin M., Afouda S., Ouani T. & Peugeot C., 2004. Rapport de campagne limnimétrique. *IRD-DGH Cotonou.*, 30 P.
- 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*, 320 P.
- Viers J., Dupré B., Braun J.-J., Deberdt S., Angeletti B., Ngoupayou J.N., & Michard A., 2000. Major and trace element abundances and strontium isotopes in the Nyong basin rivers (Cameroon): constraints on chemical weathering processes and elements transport mechanisms in humid tropical environments. *Chem. Geol.*, 169, 211-241.

Wagner G.H. & Stelle K.F., 1985. Use of rain and dry deposition compositions for interpreting groundwater chemistry. *Groundwater*, 23, 611-616.

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

Zin I., Braud I, Chen T., Gandola F., Haverkamp R., Vachaud G. & 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.

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre du programme AMMA.	14
Figure 2 : Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO)....	15
Figure 3 : Bassin versant (BV) de la Donga et ses sous-bassins considérés, Ara et Donga-Kolo.	16
Figure 4 : Cultures d'igname et de coton (13/08/2004)	21
Figure 5 : Exemple d'organisation des villageoises lors du puisage de l'eau (puits de Moné et forage de Kparsi, 25/07/2003).....	22
Figure 6 : Topographie et réseau hydrographique sur le bassin de la Donga (MNT issu de la mission SRTM).	23
Figure 7 : Intermittence des écoulements de surface : la rivière Donga en saison sèche (février 2003) et humide (juillet 2003).....	24
Figure 8 : Occupation des sols du bassin versant de la Donga en 2003 : classification scène SPOT du 22/10/2003 et ERS du 23/04/2003, projection UTM WGS84 (zone 31N).	25
Figure 9 : Carte pédologique au 1/200 000e du bassin de la Donga (Faure, 1977).	27
Figure 10 : Carte géologique au 1/200 000e du bassin de la Donga (BRGM/OBM, 1984). ..	27
Figure 11 : Points de prélèvement géologique servant de site piézométrique (en bleu) dans le bassin versant d'Ara ; toposéquence PO1 à 3 stations (Am = Amont, Mi = Milieu et Av = Aval) de 3 piézomètres chacune (2 m, 10 m et 20 m). Les profils PO2, PO8 et PO7 ont servi uniquement à la géophysique (Robain et Wubda, 2004).	28
Figure 12 : Positionnement des forages d'hydraulique villageoise répertoriés sur le bassin versant de la Donga et sur ses bordures, la coupe lithologique du forage de Béléfoungou sera décrite.	33

Figure 13 : Coupe lithostratigraphique du forage de Béléfoungou.	33
Figure 14 : Profondeur de la limite supérieure du substratum sain et fissuré et profondeur des puits servant aux mesures piézométriques.	34
Figure 15 : Résultat de l'inversion des mesures de résistivité à l'échelle 1/1 pour le profil PO1 (cf. figure 8) du site piézométrique expérimental (Robain et Wubda, 2004).....	35
Figure 16 : Profil géophysique dans le bassin d'Ara Pont : dispositif Wenner alpha, écartement électrode 4 mètres, correction topographique (Descloitres et al., 2003).	36
Figure 17 : Réseau de pluviographes et station météorologique sur le bassin de la Donga....	42
Figure 18 : Indices pluviométriques de 1950 à 2004 sur le bassin de la Donga.	43
Figure 19 : Fréquence au non dépassement des hauteurs annuelles sur la base des chroniques 1950-2004 à la station de Djougou et 1950-2001 à la station de Djougou complétée par la moyenne 2002, 2003 et 2004 de l'ensemble du bassin.	44
Figure 20 : Répartition spatiale des cumuls pluviométriques annuels (en mm) sur le bassin versant de la Donga en 2002.	45
Figure 21 : Répartition spatiale des cumuls pluviométriques annuels (en mm) sur le bassin versant de la Donga en 2003.	46
Figure 22 : Répartition spatiale des cumuls pluviométriques annuels (en mm) sur le bassin versant de la Donga en 2004.	46
Figure 23 : Contribution moyenne mensuelle par rapport à la pluviométrie annuelle (%) avant et après la rupture pluviométrique de 1969 à la station de Djougou et sur l'ensemble du bassin de la Donga en 2002, 2003 et 2004.....	47
Figure 24 : Fréquence au non dépassement calculée sur la base des cumul moyens journaliers à la station de Djougou (A) et sur l'ensemble du bassin (B).....	48

Figure 25 : Valeurs moyennes mensuelles de l'ETP Penman (mm/j) à Natitingou et Parakou (Le Barbé et al., 1993) et valeurs mensuelles de l'évaporation Colorado sur bac (mm/j) à Djougou (Rodier, 1964).	50
Figure 26 : Évapotranspiration potentielle annuelle calculée à partir des variables climatiques mesurées à la station météorologique de Djougou pour les années 2002, 2003 et 2004.	52
Figure 27 : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm.jour ⁻¹) calculée à partir des variables climatiques mesurées à la station météorologique de Djougou pour les années 2002, 2003 et 2004.....	53
Figure 28 : Évapotranspiration potentielle journalière calculée à partir des variables climatiques mesurées à la station météorologique de Djougou pour les années 2002, 2003 et 2004.....	53
Figure 29 : Réseau de puits villageois et site piézométrique expérimental sur le bassin de la Donga.	55
Figure 30 : Fréquence au non dépassement des profondeurs des puits servant aux mesures piézométriques.	55
Figure 31 : Les composantes du système automatique de mesure piézométrique.	56
Figure 32 : Exemple typique de l'amplitude des fluctuations piézométriques dues aux puisages domestiques quotidiens.	58
Figure 33 : Mesures « lecteur » effectuées matin, midi et soir à la station d'Ananiga	59
Figure 34 : Niveaux historique et récent de la nappe phréatique mesurés respectivement dans les forages et puits les plus proches.	60
Figure 35 : Profondeur de la nappe phréatique et altitude du sol au point de mesure.	61
Figure 36 : Variation interannuelle de la piézométrie à la station de Djougou.....	62

Figure 37 : Relation pluie-recharge-vidange. A : pluviométrie et piézométrie aux stations pluviométrique et piézométrique de Babayaka ; B : pluviométrie et piézométrie moyenne (\pm écart-type en pointillé) sur le bassin de la Donga en 2002, 2003 et 2004.....	63
Figure 38 : P, la pluie annuelle et R(5%) et R(1%), la recharge annuelle avec respectivement des porosités fixes de 5 et 1 %	65
Figure 39 : Schéma d'équipement du versant piézométrique expérimental : 3 stations à 3 piézomètres chacune (2, 10 et 20 m).....	65
Figure 40 : Comparaison entre les mesures automatiques CTD et les mesures manuelles réalisées tous les deux jours par l'observateur villageois à la station Amont (10 m).	66
Figure 41 : Pluie journalière (pluviographe de Nalohou 2) et niveau de la nappe phréatique aux stations Amont, Milieu et Aval (2, 10 et 20 m) en 2004.	68
Figure 42 : Recharge sur l'ensemble du bassin et aux stations expérimentales (Amont, Milieu et Aval, profondeurs : 10 et 20 m) pour des porosités fixes de 1 et 5 %.....	69
Figure 43 : Stations hydrométriques sur le bassin de la Donga.	71
Figure 44 : Débit instantané à l'exutoire du bassin de la Donga (Donga-Pont) de 1998 à 2004 et fenêtre d'étude.....	72
Figure 45 : Lames mensuelles drainées et précipitées sur chaque sous-bassin en 2002, 2003 et 2004 (a = avril, A = août, j = juin et J = juillet).	73
Figure 46 : Coefficient d'écoulement α (L_e/L_p) mensuels sur les 3 bassins pour les années 2002, 2003 et 2004 ; L_p = lame précipitée (mm) et L_e = lame écoulée (mm).....	74
Figure 47 : Lames journalières cumulées, précipitées (L_p) et écoulées (L_e) sur le bassin de la Donga (station de Donga-Pont) en 2002, 2003 et 2004.	76
Figure 48 : Lames précipitées et drainées par le bassin versant d'Ara en 2003.....	76

Figure 49 : Hydrogramme enregistré à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont en 2002, 2003 et 2004.....	78
Figure 50 : Lames journalières précipitées (A), lames journalières écoulées à l'exutoire du bassin (B) et profondeur moyenne journalière de la nappe (C) pour les années 2002, 2003 et 2004.....	80
Figure 51 : Schéma type de fonctionnement de versant sur le bassin de la Donga. P est la pluie, E est l'évapotranspiration, RR est le ruissellement direct, SS est l'écoulement de subsurface et Fp le flux profond.....	81
Figure 52 : Écoulement de subsurface sur le bassin d'Ara (long. : 1.6639° E, lat. : 9.7622° N, août 2003).....	82
Figure 53 : Déficit d'écoulement en 2002, 2003 et 2004 sur le bassin de la Donga.....	82
Figure 54 : Mécanismes d'acquisition des charges chimiques dissoutes par l'eau (Aubouin et al., 1968).....	86
Figure 55 : Schéma du processus de transformation des plagioclases en argiles de néoformation dans les roches cristallines.....	87
Figure 56 : Forages d'hydraulique villageoise présentant des données chimiques historiques (période de foration : 1984-2002).	88
Figure 57 : Fréquence au non dépassement des C.E. mesurées lors de la réalisation des forages d'hydraulique villageoise sur le bassin de la Donga.	89
Figure 58 : C.E. en fonction de la profondeur moyenne des crépines.	90
Figure 59 : Contribution moyenne des ions majeurs à la minéralisation des eaux.	91
Figure 60 : Réseau de mesure physico-chimiques et isotopiques à l'échelle de la zone d'étude ; le nombre de stations est indiqué entre parenthèse.	92

Figure 61 : Pluviomètre de Nalohou II (9°44' N, 1°36' E) servant à l'échantillonnage géochimique des précipitations (photo du 25/07/03).	92
Figure 62 : Mallette de mesure physico-chimique (photo du 30/08/03).	94
Figure 63 : Exemple d'un puits villageois largement ouvert et mal entretenu (Pamido, juillet 2003).	96
Figure 64 : Pics anormaux de la C.E., conséquence du traitement des puits, à base de javel (NaOCl), par les services de l'hydraulique villageoise (exemple du puits d'Ananinga).	97
Figure 65 : Températures des précipitations et de l'air mesurées à la station météorologique de Djougou en 2003.	99
Figure 66 : Diagramme de Piper des précipitations en saisons sèche et humide.	100
Figure 67 : Compositions moyennes en ions majeurs des pluies de saisons humide et sèche de la zone d'étude avec 3 pluies d'Afrique de l'Ouest (Freydier et al., 1998 ; Freydier et al., 2002).	102
Figure 68 : Compositions moyennes en éléments traces des pluies de la zone avec 3 pluies d'Afrique de l'ouest (Kollo au Niger, Lamto en Côte d'Ivoire et Nsimi au Cameroun ; Freydier et al., 2002).	103
Figure 69 : Fréquence au non dépassement des C.E. des réservoirs d'altérite pour les 17 puits mesurés régulièrement.	106
Figure 70 : (A) Variabilité saisonnière de la C.E. pour les groupes A (n = 8) et B (n = 7) en parallèle à (B) la pluviométrie et à la dynamique de la nappe libre à l'échelle de l'ensemble du bassin en 2003.	107
Figure 71 : Variation temporelle de la C.E. dans les réservoirs d'altérite en parallèle à la piézométrie.	108

Figure 72 : Répartition spatiale des points de mesure en fonction des classes de C.E.	109
Figure 73 : Fréquence cumulée des C.E. des réservoirs de socle (n = 7).....	110
Figure 74 : Variabilité saisonnière de la C.E. pour les réservoirs de socle (n = 7).	110
Figure 75 : Diagramme de Piper pour les plus faibles et fortes valeurs saisonnières de la C.E. pour le groupe A (sens de la flèche = ordre chronologique des campagnes : février 2003 (F03), juillet 2003 (J03), août 2003 (A03), septembre 2003 (S03) et octobre 2003 (O03))..	113
Figure 76 : Concentrations moyennes en ions majeurs pour les groupes A (n=8) et B (n=7) pour les mois de février 2003 (saison sèche) et septembre (saison humide).	114
Figure 77 : Diagramme de Piper pour les plus faibles et plus fortes valeurs saisonnières de C.E. du réservoir de socle ; (sens de la flèche = ordre chronologique des campagnes, février 2003 (F03), juillet 2003 (J03), août 2003 (A03), septembre 2003 (S03) et octobre 2003 (O03).	116
Figure 78 : Comparaison des concentrations moyennes en ion majeurs dans les eaux de socle et des altérites du groupe A en février 2003 (saison sèche) et septembre 2003 (saison humide).	117
Figure 79 : Compositions moyennes anciennes et récentes en ions majeurs pour les eaux de socle.....	118
Figure 80 : Concentration moyenne en éléments traces pour les groupes A et B en février 2003 (saison sèche) et septembre 2003 (saison humide).	119
Figure 81 : Comparaison entre la concentration moyenne en éléments traces des eaux de socle et des altérites.....	120
Figure 82 : Température moyenne pour les profondeurs de 2, 10 et 20 m aux stations Amont, Milieu et Aval.....	121

Figure 83 : pH moyen pour les profondeurs de 2, 10 et 20 m aux sites Amont, Milieu et Aval.	122
Figure 84 : Évolution temporelle de la C.E. à 2 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval en parallèle à la pluie journalière (station pluviométrique de Nalohou) en 2004.....	123
Figure 85 : Évolution temporelle de la conductivité électrique à 10 et 20 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval en parallèle à la pluie journalière (station pluviométrique de Nalohou) en 2004.	124
Figure 86 : Diagramme de Piper des eaux à 1 et 2 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval.....	125
Figure 87 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées à 10 et 20 m de profondeur aux stations Amont, Milieu et Aval.	126
Figure 88 : Variation temporelle des teneurs en silicium à différentes profondeurs aux stations Amont, Milieu et Aval pendant la saison pluvieuse 2004.	127
Figure 89 : Variation temporelle des teneurs en ions majeurs à 2, 10 et 20m à la station Amont pendant la saison pluvieuse 2004.....	128
Figure 90 : Variation temporelle des teneurs en ions majeurs à 2, 10 et 20m à la station Milieu pendant la saison pluvieuse 2004.	129
Figure 91 : Variation temporelle des teneurs en ions majeurs à 2, 10 et 20m à la station Aval pendant la saison pluvieuse 2004.	130
Figure 92 : Concentrations en éléments traces à la station Amont à 2, 10 et 20 m.....	132
Figure 93 : Schéma conceptuel des composantes théoriques des eaux de rivière.....	134
Figure 94 : Dates de mesure physico-chimique hors crue et débits correspondants en 2003 et 2004.....	136

Figure 95 : C.E. en fonction du débit de base à Ara-Pont.....	137
Figure 96 : C.E. en fonction du débit de base à Donga-Kolo.....	137
Figure 97 : C.E. en fonction du débit de base à Donga-Pont.	138
Figure 98 : Diagramme de Piper pour les écoulements de base.....	139
Figure 99 : Teneur en Si en fonction du débit des écoulements de base à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.....	140
Figure 100 : Teneurs des cations dans les débits de base à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.....	141
Figure 101 : Composition moyenne en éléments traces dans les écoulements de base.	142
Figure 102 : Positionnement des crues suivies aux trois stations limnimétriques en 2003 par rapport à la pluviométrie et la piézométrie moyennes sur l'ensemble du bassin.	143
Figure 103 : Évolution de la température mesurée manuellement lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).....	144
Figure 104 : Température automatique (mesure HYDREKA- Greenspan) lors de la crue 1 à la station limnimétrique de Donga-Kolo.....	145
Figure 105 : Évolution du pH lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).	146
Figure 106 : Évolution de l'O ₂ dissous lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).	147
Figure 107 : Évolution de la C.E. lors de la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).....	148

Figure 108 : Exemple (A) d'augmentation brutale de la C.E. en début de crue et (B) de hausse anormale en fin de crue à la station limnimétrique de Donga-Kolo.....	149
Figure 109 : Évolution simultanée de la C.E. et de la température (HYDREKA-Greenspan) lors de la crue 1 à Donga-Kolo.....	150
Figure 110 : Variation des teneurs en silicium dans la crue 3 aux trois stations limnimétriques (Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont).	151
Figure 111 : Variation des teneurs en ions majeurs dans la crue 3 à Ara-Pont.....	152
Figure 112 : Variation des teneurs en ions majeurs dans la crue 3 à Donga-Kolo.	152
Figure 113 : Variation des teneurs en ions majeurs dans la crue 3 à Donga-pont.	152
Figure 114 : Variation des teneurs en éléments traces lors de la crue 3 à Ara-Pont.	154
Figure 115 : Variation des teneurs en éléments traces lors de la crue 3 à Donga-Kolo.....	154
Figure 116 : Variation des teneurs en éléments traces lors de la crue 3 à Donga-Pont.	155
Figure 117 : Oxygène-18 en fonction de la hauteur de pluie à l'échelle événementielle.	159
Figure 118 : Différentiation isotopique (moyenne et écart-type) entre les eaux de recharge et les eaux souterraines pour le mois de juillet 2003.	161
Figure 119 : Comparaison des teneurs isotopiques entre réservoirs d'altérite et de socle.....	161
Figure 120 : Teneurs en oxygène-18 dans les écoulements de base en fonction du débit. ...	163
Figure 121 : Variation en oxygène-18 dans la crue 3 à Ara-Pont.	164
Figure 122 : Variation en oxygène-18 dans la crue 3 à Donga-Kolo.....	164

Figure 123 : Variation en oxygène-18 dans la crue 3 à Donga-Pont.	164
Figure 124 : Relation oxygène-18 et deutérium dans les précipitations, les écoulements de surface et les réservoirs souterrains.....	166
Figure 125 : C.E. moyenne caractéristique des pluies, des écoulements de base et des réservoirs d'altérite.....	168
Figure 126 : Compositions chimiques caractéristiques des pluies, des écoulements de base, des réservoirs d'altérites à 2, 10 et 20 m à la station Amont.....	169
Figure 127 : Na et Cl vs Si dans les pluies, les écoulements de surface à Ara-Pont, des drains secondaires à la rivière Ara et les réservoirs d'altérite et de socle.....	171
Figure 128 : Na vs Si dans les pluies, les écoulements de surface à Donga-Kolo et les réservoirs d'altérite et de socle.....	172
Figure 129 : Si vs Na dans les pluies, les écoulements de surface à Donga-Pont et les réservoirs d'altérite et de socle.....	173
Figure 130 : Ba et B vs Sr dans les pluies, les écoulements de surface à Ara-Pont et les réservoirs d'altérite et de socle.....	174
Figure 131 : Sr vs Ba pour les pluies, les écoulements de surface à Donga-Kolo et les réservoirs d'altérite et de socle.....	175
Figure 132 : Sr vs Ba dans les pluies, les écoulements de surface à Donga-Pont et les réservoirs d'altérite et de socle.....	176
Figure 133 : Équilibre entre phase solide et phase aqueuse : domaine de stabilité du système argileux CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O.	178
Figure 134 : Résultat de la déconvolution de la crue 1 à Ara-Pont en écoulements rapide (Q _r) et lent (Q _l) pour chacun des traceurs retenus.	188

Figure 135 : Résultat de la déconvolution de la crue 1 à Donga-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.	189
Figure 136 : Résultat de la déconvolution de la crue 2 à Donga-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.	190
Figure 137 : Résultat de la déconvolution de la crue 3 à Ara-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.	191
Figure 138 : Résultat de la déconvolution de la crue 3 à Donga-Kolo en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.	192
Figure 139 : Résultat de la déconvolution de la crue 3 à Donga-Pont en écoulements rapide (Q_r) et lent (Q_l) pour chacun des traceurs retenus.	193
Figure 140 : Écoulement total mesuré (Q_t) et contributions moyennes des réservoirs superficiels simulées (Q_l) à partir de la C.E. à Donga-Kolo pour l'année 2003.	194
Figure 141 : Écoulement total mesuré (Q_t) et contributions moyennes des réservoirs superficiels simulées (Q_l) à partir de la C.E. à Donga-Kolo pour l'année 2004.	195
Figure 142 : Contributions du réservoir de subsurface (en pointillés) simulées à partir des traceurs retenus, pour chacune des crues échantillonnées à chaque station.	197
Figure 143 : Gamme d'incertitude et contribution moyenne des réservoirs superficiels (Q_l) à l'écoulement total (Q_t) en 2003.	199
Figure 144 : Gamme d'incertitude et contribution moyenne des réservoirs superficiels (Q_l) à l'écoulement total (Q_t) en 2004.	199
Figure 145 : Contribution annuelle du ruissellement rapide et de l'écoulement lent à l'écoulement total à Donga-Kolo en 2003 et 2004 (écart-type de 13 %).	200

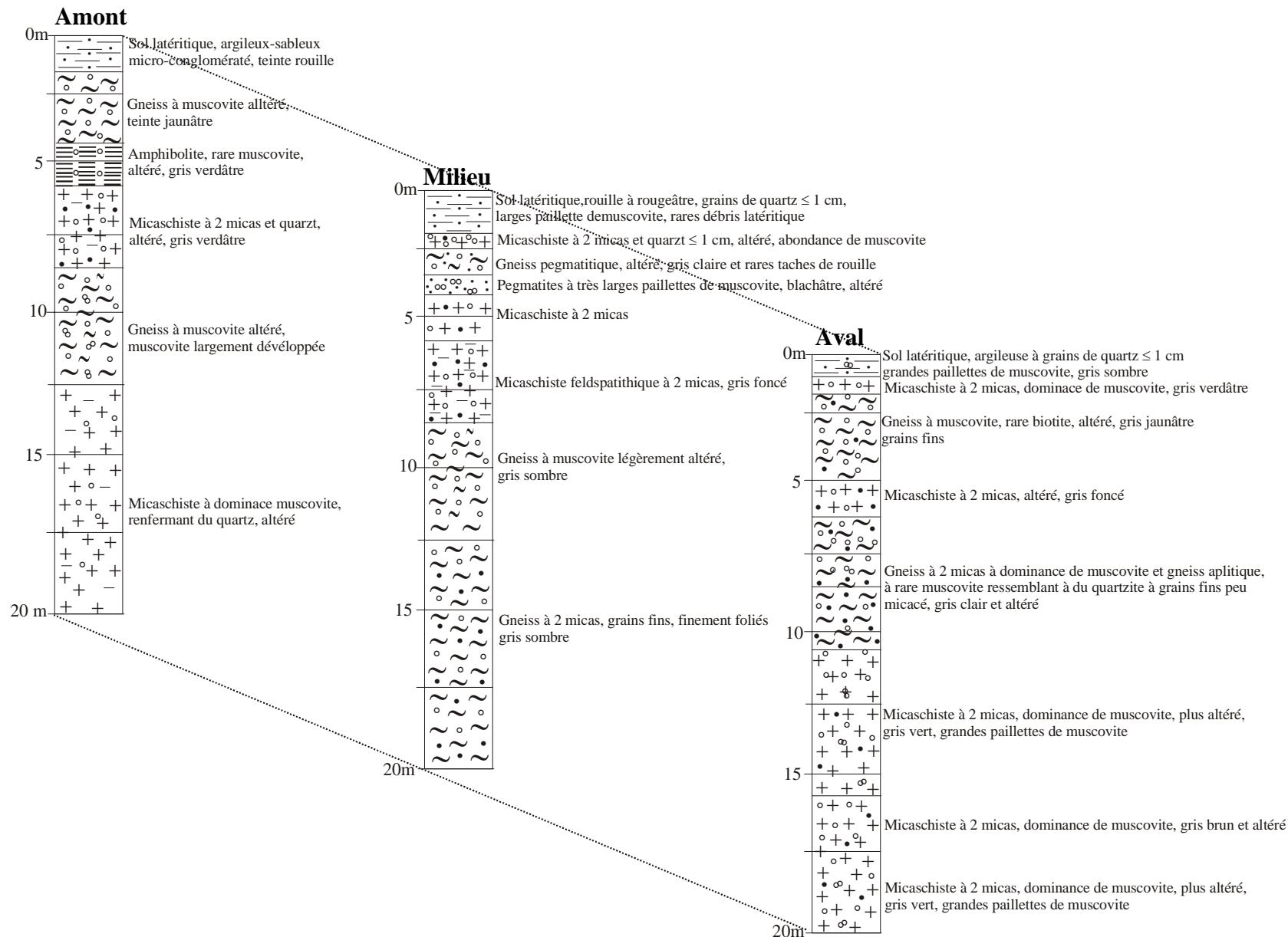
LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Spécificités géologiques de chaque site (Amont, Milieu et Aval).....	29
Tableau 2 : Fréquence d'apparition des éléments chimiques dans les roches analysées par diffractométrie rayons X en fonction de la profondeur.....	31
Tableau 3 : Résultat du slug-test réalisé sur le site expérimental de Nalohou.....	37
Tableau 4 : Récurrence au dépassement des pluies annuelles 2002, 2003 et 2004 à la station de Djougou et pour l'ensemble du bassin.	45
Tableau 5 : Caractéristiques de la station météorologique de Djougou.....	51
Tableau 6 : Coefficient d'écoulement annuel α (L_e/L_p) sur les 3 bassins pour les années 2002, 2003 et 2004 ; L_p = lame précipitée (mm) et L_e = lame écoulée (mm).....	73
Tableau 7 : Caractéristiques des écoulements et du tarissement sur le bassin versant de la Donga et de ses deux sous-bassins (Ara et Donga-Kolo) en 2002, 2003 et 2004.....	79
Tableau 8 : T° , pH, O_2 et C.E. moyens dans les précipitations (saisons sèche et humide)...	100
Tableau 9 : Températures moyennes (m) et écart-types (σ) dans les réservoirs d'altérite et de socle ; le nombre de stations est indiqué entre parenthèses (altérite, socle).	104
Tableau 10 : pH moyens (m) et écart-types (σ) mesurés dans les eaux des réservoirs d'altérite et de socle ; (nombre de stations indiqué entre parenthèses (altérite, socle)).....	104
Tableau 11 : Concentrations moyennes (m) en oxygène dissous (%) et écart-types (σ) mesurées dans les réservoirs d'altérite et de socle ; le nombre de stations est indiqué entre parenthèse (altérite;socle).....	105
Tableau 12 : C.E. dans les réservoirs d'altérite et de socle mesurée aux puits et forages les plus proches (séparés de 20 à 130 m de distance).....	112
Tableau 13 : Nombre d'échantillons analysés par station.	121

Tableau 14 : Teneurs isotopiques annuelles dans les précipitations de 1989 enregistrées à Parakou, Savé, Bohicon et Cotonou au Bénin ; $\delta^{18}\text{O}$ = moyenne en oxygène 18, $\delta^2\text{H}$ moyenne en deutérium, dp = excès en deutérium, ΔT = variation moyenne de la température.....	156
Tableau 15 : Teneurs isotopiques événementielles dans les précipitations (en gras : évaporation probable due à une collecte tardive).....	158
Tableau 16 : Moyenne isotopique du mois de juillet 2003 pour les précipitations.....	159
Tableau 17 : Teneurs isotopiques dans les réservoirs d'altérites et de socle (les altérites sans correspondant socle sont indiquées en italique).....	160
Tableau 18 : Teneurs isotopiques dans les écoulements de base.....	162
Tableau 19 : C.E. caractéristiques (moyenne et écart-type) des compartiments.	185
Tableau 20 : Récapitulatif des volumes totaux transités par les sections des rivières lors des crues échantillonnées et des apports des réservoirs superficiels (écoulement lent) à l'écoulement total.....	198
Tableau 21 : Contribution annuelle des réservoirs de subsurface en 2003 et 2004.....	200

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques lithologiques du transect piézométrique expérimental (Amont, Milieu et Aval).



**Annexe 2 : Nature minéralogique des roches analysées par diffractométrie rayons X
et formules chimiques associées (26 échantillons analysés).**

Groupe	Nature des minéraux	Type de minéraux	Formule chimique
I	Albite	Feldspath	KAlSi_3O_8
	Muscovite	Feldspath	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_9$
	Kaolinite	Mica	$\text{K}(\text{MgFe})_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OHF})_2$
	Quartz	Primaire	$\text{Na}_{0,5}\text{Al}_{1,5}\text{Mg}_{0,5}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
II	Biotite	Mica	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
	Clinochlore	Primaire	SiO_2
	Microcline	Feldspath	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	Montmorillonite	Argile de néoformation ou mica	$\text{KAl}_2(\text{OHF})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$
III	Gœthite	Oxyde de fer	FeOOH
	Magnésiohornblende	Amphibole	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Al}(\text{AlSi}_7\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
IV	Magnésioriebeckite	Amphibole	$\text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Fe}^{2+}3\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Montronite	Feldspath	$\text{KAl}(\text{Si}_3\text{O}_8)$
	Orthclase		
	Sanidine		
	Saponite		

Annexe 3 : Caractéristiques des forages villageois (Jacquin et Seygona, 2004).

N°	Localités	Village	Long. (°E)	Lati. (°N)	Altitude (m)	Réalisation
D 3152	Al Hamdou	Alfa-Issa	1,6878	9,7606	431	03/06/2002
A 785	Ananina	Ananina	1,9028	9,7167	330	24/02/1988
D 3154	Ananina	awalaté	1,9034	9,7173	381	09/06/2002
A 511	Kolokondé	Bamisso	1,7250	9,9083	400	29/03/1984
A 516	Bariénou	Bariénou	1,7667	9,7167		03/04/1984
A 2229	Béléfougou	Béléfougou	1,7167	9,8167		23/10/1996
A 623	Béléfougou	Béléfougou	1,7167	9,8167	400	07/06/1984
A 744	Gaounga	Bortoko	1,8992	9,8003	320	26/01/1988
A 2213	Bariénou	Dedera	1,7575	9,7083		28/06/1996
A 514	Bariénou	Dedera	1,7500	9,7083	400	30/03/1984
A 3153	Djakpengou	Djakpengou	1,6752	9,7943	423	04/06/2002
D 3155	CEG	Donga	1,9499	9,7140		18/07/2002
A 518	Donga	Donga	1,9500	9,7167		03/04/1984
D 3160	Al Hamdou	Foumbéa	1,7724	9,9063	422	14/06/2002
A 504	Kolokondé	Foumbéa	1,7667	9,9083		27/03/1984
A 540	Founga	Founga	1,5917	9,6833		17/04/1984
A 2206	Lama	Foyo	1,9236	9,7167		20/06/1996
A 517	Foyo	Foyo	1,9333	9,7167		02/04/1984
A 743	Foyo	Foyo II	1,9306	9,7111	340	21/01/1988
D 3156	Sœur Mission	Gaounga	1,9459	9,7529	369	13/06/2002
A 519	Gaounga	Gaounga	1,9500	9,7500	332	03/04/1984
A 775	Gaounga	Gaounga I et II	1,2780	9,7750	320	17/02/1988
A 787	Foyo	Gnansonga	1,9555	9,6569	337	24/02/1988
A 2207	Koua	Gnongambi I	1,8044	9,7612		24/06/1996
A 2209	Koua	Gnongambi II	1,8108	9,7586		25/06/1996
A 2210	Koua	Gniouri	1,8583	9,7722		26/06/1996
A 741	Koua	Gniouri	1,8583	9,7667	363	21/01/1988
A 789	Donga	Gosso	2,0514	9,7500	340	24/02/1988
A 2233	Gaounga	Kokossika	1,9313	9,7654		05/03/1997
A 746	Gaounga	Kokossika	1,9317	9,7678	320	26/01/1988
A 621	Kolokondé	Kolokondé	1,7667	9,9000	400	06/06/1984
D 3195	CEG	Kolokondé	1,7976	9,9028		19/07/2002
A 523	Koua	Koua	1,7685	9,7582	400	04/04/1984
A 531	Kparsi	Kparsi	1,6417	9,7833		09/04/1984
A 2212	Bariénou	Kpayérou	1,8668	9,6583		28/06/1996
A 513	Kpégounou	Kpégounou	1,7833	9,8167		30/03/1984
A 2202	Kparsi	Midjiniba	1,6639	9,7622		15/06/1996
A 522	Moné	Moné	1,8500	9,7333	370	04/04/1984
A 507	Kolokondé	Oualmoura	1,7502	9,8483		28/03/1984
A 742	Moné	Simbongou	1,8208	9,7392	400	21/01/1988
A 625	Djougou	Soubroukou	1,6417	9,6667		06/06/1984
A 510	Kolokondé	Tolra	1,7667	9,8333		28/03/1984
D 3175	Sidi-Kpara	Wargou	1,6370	9,7271	451	06/06/2002

Annexe 3. 1 : Caractéristiques des forages villageois (Jacquin et Seygona, 2004).

Localités	Epaisseur cuirasse (m)	Epaisseur Argile (m)	Epaisseur d'altérite (m)	Profondeur zone fissurée (m)	Profondeur socle sain (m)	Nature du socle
Al Hamdou	2,0	5,0	3,0	10,0	13,0	gneiss
Ananina	2,0		2,0	4,0	18,0	gneiss
Ananina	2,0	4,0	7,0	13,0	28,0	gneiss
Kolokondé	0,5		17,5	18,0	18,0	migmatite
Bariéno	3,0	7,0	5,0	15,0	17,0	migmatite
Béléfoungou	4,0	6,0	15,0	25,0	30,0	migmatite
Béléfoungou			18,0	18,0	28,0	migmatite
Gaounga		3,0	4,0	7,0	12,0	gneiss
Bariéno	1,0	9,0	4,0	14,0	22,0	migmatite
Bariéno	2,0	5,5	8,5	16,0	22,0	migmatite
Djakpengou	3,0	Trace	7,0	10,0	13,0	gneiss
CEG	5,0	5,0	5,0	15,0	22,0	gneiss
Donga			13,0	13,0	21,5	gneiss
Al Hamdou	1,0	6,0	0,0	7,0	15,0	migmatite
Kolokondé		4,0	2,0	6,0	14,0	migmatite
Founga	3,0	3,0	12,0	18,0	32,5	gneiss
Lama	1,0	5,0	6,0	12,0	25,0	gneiss
Foyo		12,0	9,0	21,0	28,0	gneiss
Foyo						gneiss
Sœur Mission	2,0	4,0	6,0	12,0	20,0	gneiss
Gaounga		4,0	10,0	14,0	38,0	gneiss
Gaounga	3,0	Trace	10,0	13,0	16,0	gneiss
Foyo	3,0	3,0	4,0	10,0	24,0	gneiss
Koua	2,0	8,0	5,0	15,0	20,0	migmatite
Koua	4,0	3,0	13,0	20,0	25,0	migmatite
Koua	2,0	4,0	7,0	13,0	17,0	migmatite
Koua	3,0		17,0	20,0	28,0	gneiss
Donga	4,0		12,0	16,0	24,0	gneiss
Gaounga	2,0		11,0	13,0	17,0	gneiss
Gaounga	2,0	2,0		4,0	15,0	gneiss
Kolokondé	4,0		6,0	10,0	17,0	migmatite
CEG	4,0	5,0	21,0	30,0	32,0	migmatite
Koua	4,0	3,0	13,0	20,0	25,0	migmatite
Kparsi	1,0		9,0	10,0	18,0	gneiss
Bariéno	2,0	2,0	14,0	18,0	30,0	migmatite
Kpégounou	2,0	5,0	12,0	19,0	40,0	migmatite
Kparsi	2,0	4,0	9,0	15,0	18,0	gneiss
Moné	4,0	4,0	22,0	30,0	38,0	migmatite
Kolokondé	2,0	2,0	6,0	10,0	18,0	migmatite
Moné	6,0		6,0	12,0	18,0	migmatite
Djoungou	2,0	3,5	11,0	16,5	20,0	gneiss
Kolokondé	4,0		8,0	12,0	19,0	migmatite
Sidi-Kpara	2,0	5,0	8,0	15,0	18,0	gneiss

Annexe 3. 2 : Caractéristiques des forages villageois (Jacquin et Seygona, 2004).

Localités	profondeur crépine (m)	NS/sol (m)	Profondeur forage/sol (m)	Transmissivité (m²/s)
Al Hamdou	55,94 - 61,90	7,87	66,00	7,80E-06
Ananiga	19,34 - 36,50	5,79	40,30	3,80E-06
Ananiga	24,83 - 30,79, 33,75 - 36,70	3,50	41,00	1,80E-05
Kolokondé	52,00 - 64,40	Artésien	68,00	1,20E-05
Bariénou	47,10 - 58,50	2,50	61,50	5,00E-05
Béléfougou	35,00 - 46,96, 49,50 - 52,86	7,92	55,13	2,00E-06
Béléfougou	33,70 - 39,40, 50,80 - 62,20	5,20	62,20	1,20E-05
Gaounga	41,12 - 51,15	3,60	50,00	3,80E-06
Bariénou	29,35 - 35,31, 50,20 - 56,18	7,20	59,58	5,60E-06
Bariénou	51,00 - 62,40	8,20	62,30	1,80E-05
Djakpengou	41,50 - 47,50	4,27	50,00	1,04E-05
CEG	25,04 - 30,70	6,65	33,00	3,80E-05
Donga	33,00 - 44,40	6,24	45,40	4,00E-04
Al Hamdou	14,06 - 17,02, 19,98 - 31,90	1,80	50,00	1,60E-05
Kolokondé	20,50 - 43,30	3,90	43,30	1,30E-05
Founga	28,10 - 50,90	11,83	56,60	5,00E-05
Lama	30,18 - 41,92	6,93	48,03	7,50E-05
Foyo	35,60 - 47,00	12,20	50,00	2,50E-05
Foyo	43,24 - 57,00	4,85	57,00	4,20E-05
Sœur Mission	40,02 - 51,94	2,05	56,00	3,40E-05
Gaounga	42,00 - 53,50	3,80	56,50	2,94E-05
Gaounga	40,84 - 58,00	9,27	62,00	6,00E-07
Foyo	51,88 - 57,50	11,64	60,00	5,00E-05
Koua	43,35 - 58,16	3,48	61,19	3,60E-05
Koua	30,68 - 36,59, 45,51 - 54,42	6,14	56,31	1,00E-04
Koua	22,79 - 37,30	3,02	56,31	2,00E-04
Koua	26,00 - 37,76	7,65	42,90	8,40E-06
Donga	26,38 - 32,00	11,95	35,00	2,17E-05
Gaounga	23,23 - 29,19	5,93	38,00	3,00E-05
Gaounga	31,48 - 37,26, 43,24 - 58,00	5,40	60,10	5,00E-06
Kolokondé	26,20 - 43,30	5,16	45,30	1,66E-04
CEG	30,15 - 42,30, 44,99 - 47,53	6,86	55,00	5,90E-06
Koua	24,10 - 35,50	4,12	37,50	4,54E-05
Kparsi	25,00 - 36,30	5,40	36,30	1,10E-05
Bariénou	32,00 - 38,00, 98,00 - 49,70	3,13	51,82	4,50E-05
Kpégounou	36,10 - 47,50	10,02	49,50	3,30E-05
Kparsi	36,00 - 48,00, 53,00 - 58,70	4,29	55,72	1,75E-05
Moné	29,10 - 40,50	10,30	42,50	7,00E-05
Kolokondé	26,00 - 43,10	7,86	61,40	7,00E-06
Moné	45,00 - 56,30	5,05	36,00	2,27E-05
Djougou	43,83 - 49,79	3,62	61,20	8,30E-06
Kolokondé	37,51 - 43,47	11,54	45,10	1,40E-05
Sidi-Kpara	23,74 - 35,50	5,71	62,00	2,60E-05

Annexe 4 : Caractéristiques des puits villageois servant aux mesures piézométriques.

Localités	Long. (UTM)	Lat. (UTM)	Alt. margelle (m)	Prof. totale Puits	Margelle (m)	Diamètre intérieur (m)	Étranglement /margelle (m)
Ananinga	380252	1074308	385,67	12,1	0,8	1,4	
Babayaka	342425	1077928	521,26	9,7	1,1	1,3	7,5
Belefongo	359868	1085200	446,13	12,95	0,8	1,8	4,5
Bortoko	379276	1083944	395,19	14	0,8	1,8	
CPR-Sosso	362792	1087601	435,53	11,76	0,9	1,55	
Dendougou	360612	1076431	428,49	11,77	1,25	1,8	
Djakpengou	354966	1082777	463,66	10,70	1,1	1,95	5,5
Djougou	353994	1073376	472,31	8,74	0,63	1,85	8,45
Founga	345498	1071177	505,99	18,1	0,8	1,8	
Foyo	383357	1073726	369,84	9,87	0,77	1,4	
Gangamou	374354	1088880	425,08	14,03	0,95	1,8	
Gaounga	384600	1076758	387,65	6,91	0,8	1,4	4,7
Gniouri	375022	1079442	404,96	10,96	0,76	1,8	6,35
Koko-sika	383108	1079976	388,2	11,51	0,8	1,4	
Kolokondé	366117	1093400	448,43	11,42	0,8	1,8	5,7
Kpegounou	366466	1084530	414,92	11,47	0,73	1,6	
Koua	367437	1079381	431,75	12,58	0,81	1,95	
Kountia	371026	1081418	413,61	13,01	0,6	1,9	5,5
Mone	373542	1075301	419,41	11,21	0,82	1,15	
Pamido	350265	1074369	468	11,7	0,62	1,4	
Sankoro	369989	1091610	437,47	11,58	0,72	1,4	7,74
Sériveri	361901	1074174	419,61	10,77	0,95	1,32	
Tchakpaissa	359596	1073986	435,6	8,09	1,12	1,4	
Téwamou	377571	1085723	415,5	12,57	0,8	1,8	

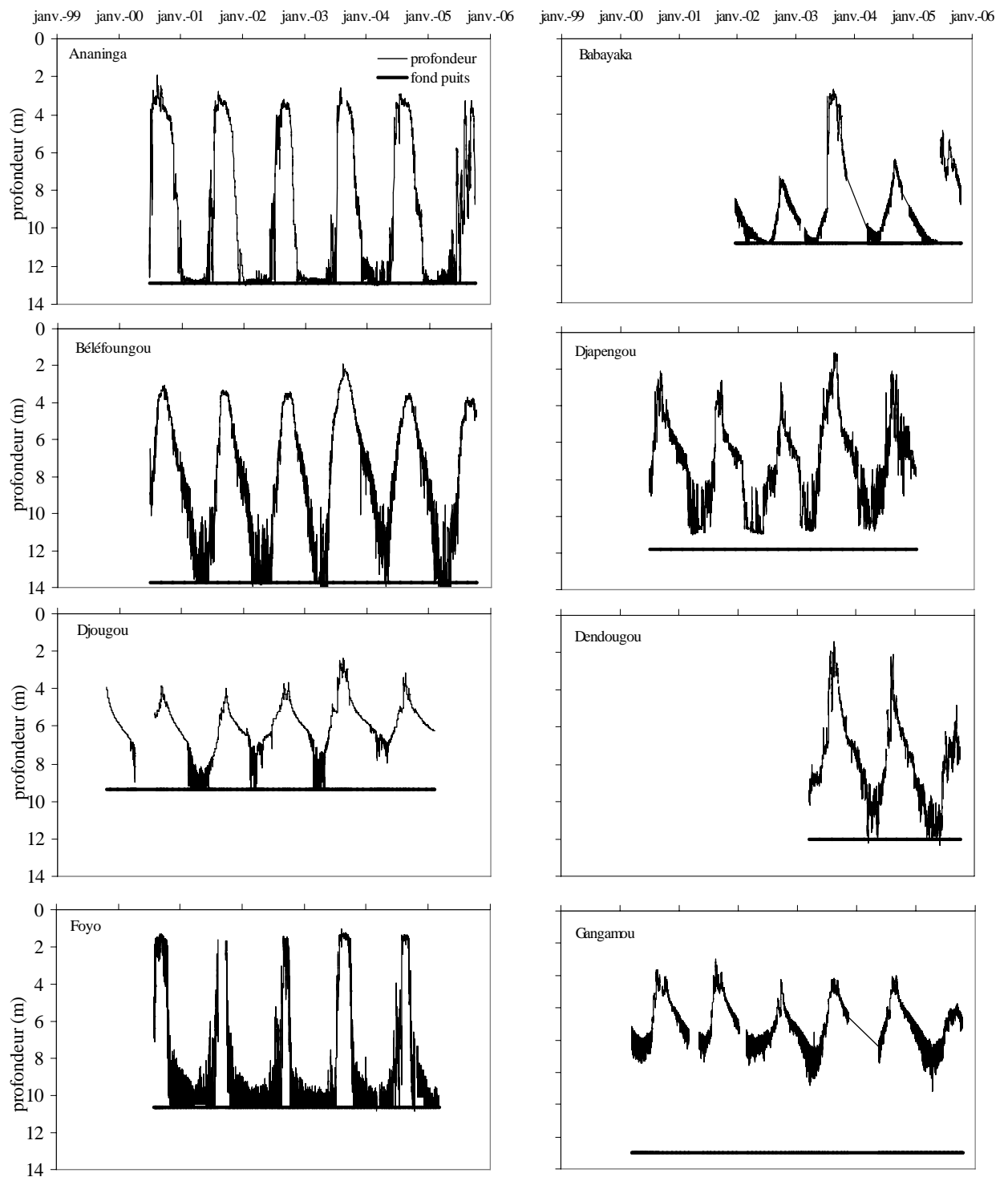
Annexe 5 : Coordonnées des stations pluviographiques.

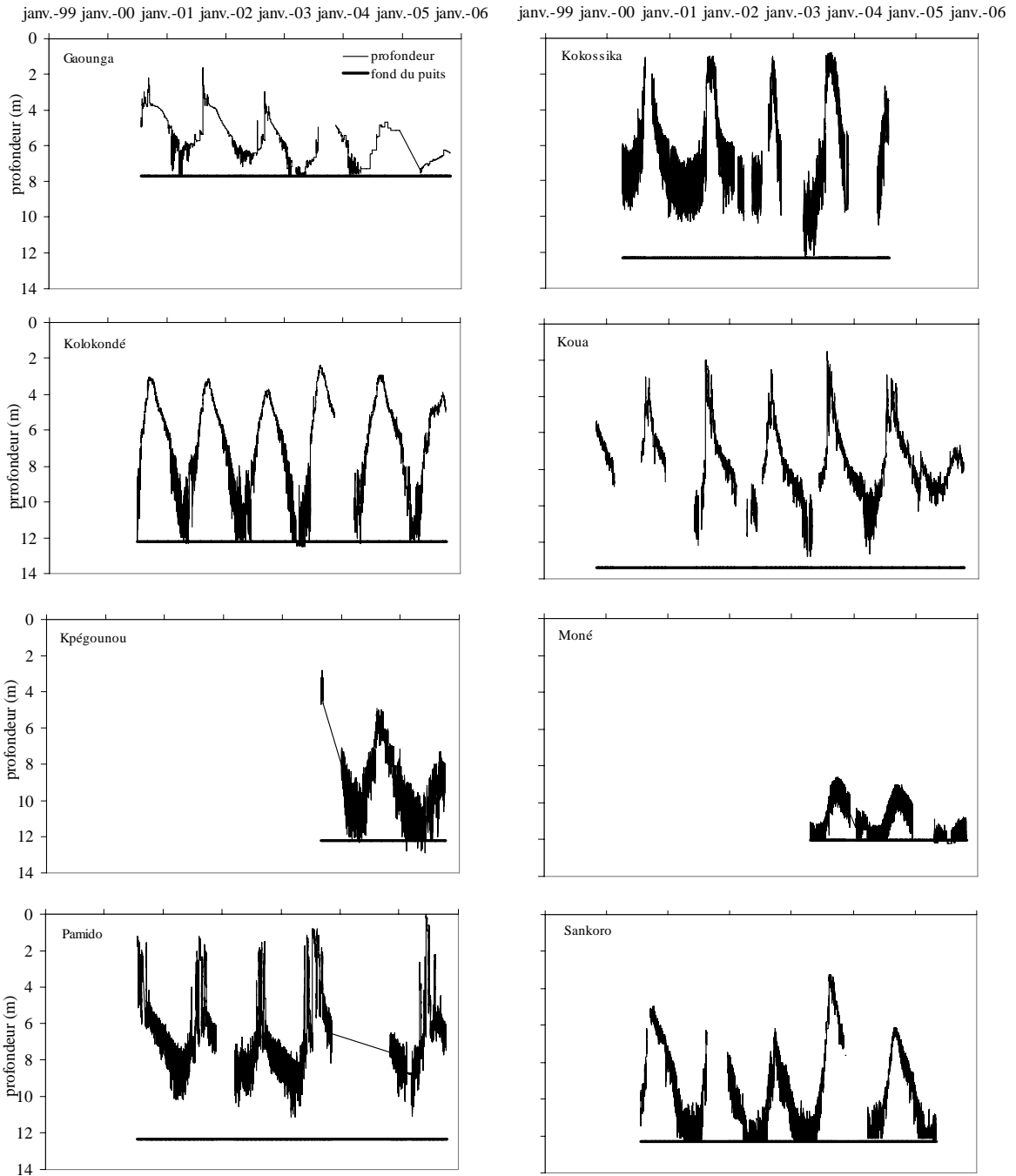
Station	Degrés décimales		Coordonnées UTM	
	Long. °E	Lat. °N	Long	Lat
Ananinga	1,90941667	9,71677778	380368	1074291
Babayaka	1,56308333	9,74788889	342385	1077873
Bariénou	1,77486111	9,71169444	365604	1073779
Dapéréfoungou	1,92638889	9,73861111	382256	1076706
Djougou	1,66149999	9,69200039	353169	1071648
Donga	1,94850000	9,71097222	384654	1073635
Gangamou	1,85122222	9,84725000	374033	1088740
Gaounga	1,94808333	9,74975000	384621	1077923
Gountia	1,82275000	9,77952778	370884	1081262
Kokossika	1,92538889	9,77372222	382140	1080582
Kolokondé	1,78516667	9,89530556	366808	1094080
Kpégounou	1,78386111	9,80836111	366630	1084465
Nalohou1	1,60405556	9,74047222	346877	1077034
Nalohou2	1,59969444	9,75905556	346407	1079091
Noumane	1,69986111	9,78072222	357405	1081443
Oualmoura	1,75172222	9,84694444	363121	1088745

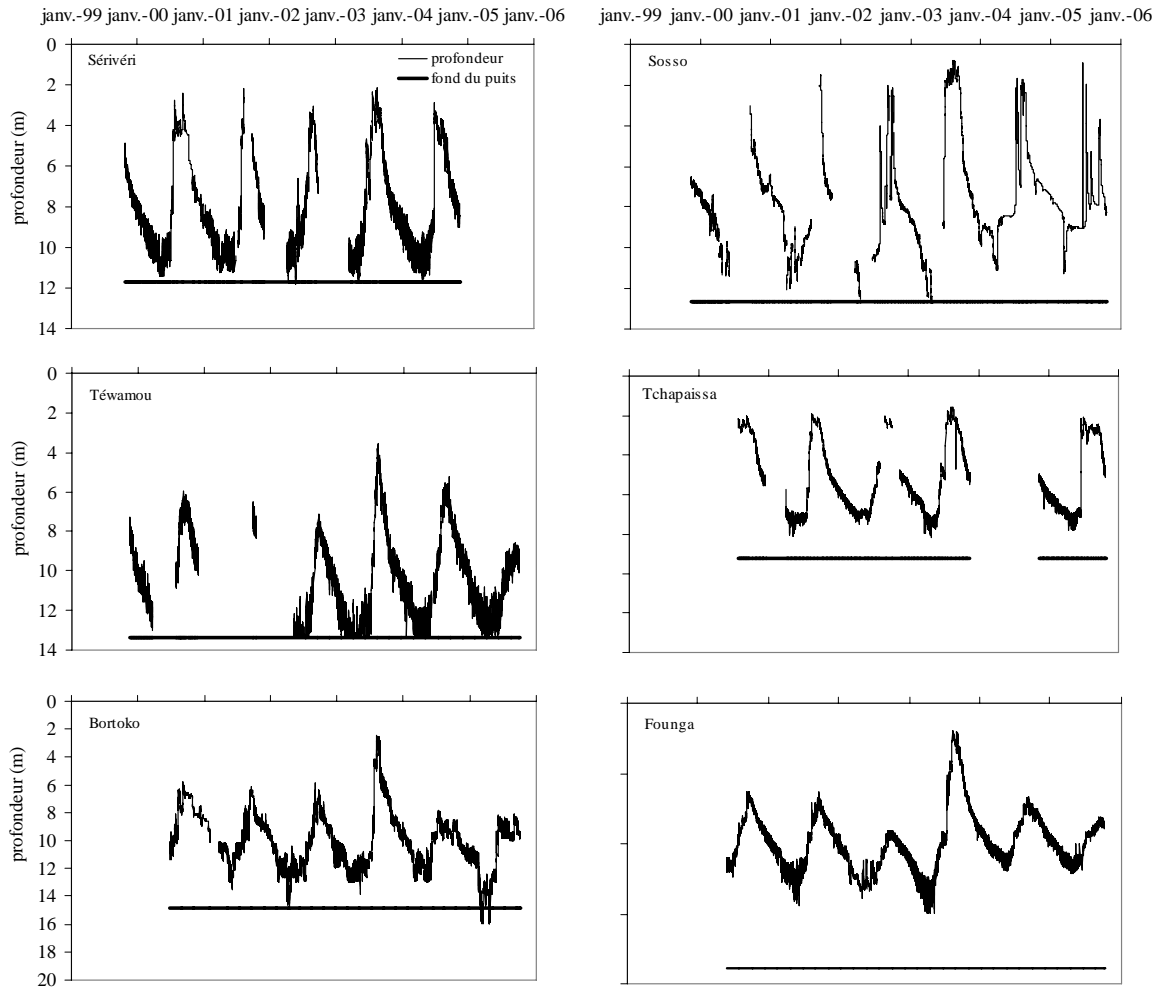
Annexe 6 : Profondeur historique de la nappe phréatique mesurée lors des essais de pompage dans les forages et profondeur récente mesurée dans le même mois dans les puits les plus proches.

Localité	Prof. crépine (m)	Prof. socle (m)	Mesure historique dans forage		Mesure récente dans puits		
			date mesure	profondeur (m)	2002	2003	2004
Ananinga	19,34 - 36,50	18,00	25/02/1988	5,79	12,72	12,73	12,10
Béléfougou	35,00 - 46,96, 49,50 - 52,86	30,00	23/10/1996	7,92	9,99	10,35	8,32
Bortoko	41,12 - 51,15	12,00	27/01/1988	3,60	10,56	11,04	9,44
Djapengou	41,50 - 47,50	13,00	03/08/2002	4,27	9,60	8,77	7,39
Foyo 1	35,60 - 47,00	28,00	04/04/1984	12,20	9,67	9,84	11,04
Foyo 2	43,24 - 57,00		25/01/1988	4,85			
Founga	28,10 - 50,90	32,50	19/04/1984	11,83	10,68	11,63	9,39
Gaounga 1	40,02 - 51,94	20,00	10/08/2002	1,37	6,23	6,04	6,80
Gaounga 2	42,00 - 53,50	38,00	09/04/1988	3,80			
Gniouri	22,79 - 37,30	17,00	02/07/1996	3,02			
Kokossika 1	23,23 - 29,19	17,00	07/04/1987	5,93	11,49	9,06	9,19
Kokossika 2	31,48 - 37,26, 43,24 - 58,00	15,00	27/01/1988	5,40			
Kolokondé	26,20 - 43,30	17,00	07/06/1984	5,18	8,23	9,33	8,54
Kpégounou	36,10 - 47,50	17,00	06/04/1986	10,07			9,22
Moné	29,10 - 40,50	38,00	05/04/1984	10,30		11,14	11,88

Annexe 7 : Fluctuation piézométrique dans les puits villageois sur le bassin de la Donga.







Annexe 8 : Profondeurs extrêmes (min et max en m) et amplitude annuelle de la nappe phréatique à chaque point de mesure pour l'année 2002.

Localité	Date min	Min	Date max	Max	Amplitude
Ananinga	13/05/2002	12,85	12/10/2002	3,42	9,43
Babayaka	30/05/2002	10,52	14/10/2002	7,39	3,13
Béléfoungou	27/05/2002	13,75	22/10/2002	3,52	10,23
Bortoko	04/05/2002	14,76	20/09/2002	5,82	8,94
Djapengou	19/06/2002	10,90	06/10/2002	2,93	7,97
Djougou	28/03/2002	9,04	16/09/2002	3,80	5,24
Founga	17/05/2002	13,92	18/09/2002	9,05	4,87
Foyo	04/05/2002	10,57	20/09/2002	1,50	9,07
Gangamou	26/03/2002	9,35	10/10/2002	4,38	4,97
Gaounga	28/04/2002	7,04	16/09/2002	3,17	3,87
Kokossika	30/03/2002	9,98	21/09/2002	1,12	8,86
Kolokondé	16/05/2002	12,22	16/10/2002	3,90	8,32
Koua	24/04/2002	11,68	16/09/2002	2,64	9,04
Pamido	26/04/2002	10,34	07/10/2002	1,62	8,72
Sankoro	25/05/2002	12,30	09/10/2002	6,34	5,96
Sérivéri	01/05/2002	11,21	16/09/2002	3,26	7,95
Sosso	24/04/2002	12,66	20/09/2002	2,25	10,41
Tchapaissa	03/05/2002	7,27	09/10/2002	2,18	5,09
Téwamou	24/06/2002	13,39	13/10/2002	7,21	6,18

Annexe 9 : Profondeurs extrêmes (min et max en m) et amplitude annuelle de la nappe phréatique à chaque point de mesure pour l'année 2003.

Localité	Date min	Min	Date max	Max	Amplitude
Ananinga	24/04/2003	12,72	21/08/2003	2,80	9,92
Babayaka	03/06/2003	10,55	10/09/2003	2,77	7,78
Béléfoungou	20/05/2003	13,75	11/09/2003	2,17	11,58
Bortoko	28/05/2003	13,87	10/09/2003	2,47	11,40
Dendougou	04/04/2003	10,18	02/09/2003	1,43	8,75
Djapengou	12/05/2003	10,63	22/09/2003	1,32	9,31
Djougou	17/04/2003	9,08	08/09/2003	2,53	6,55
Founga	03/05/2003	14,72	01/09/2003	2,22	12,50
Foyo	21/04/2003	10,58	23/09/2003	1,23	9,35
Gangamou	14/04/2003	10,62	27/09/2003	4,42	6,20
Gaounga	19/05/2003	7,71	20/10/2003	4,20	3,51
Kokossika	18/04/2003	12,31	12/09/2003	0,94	11,37
Kolokondé	15/05/2003	12,47	12/09/2003	2,55	9,92
Koua	02/05/2003	12,49	14/08/2003	1,74	10,75
Moné	09/06/2003	12,03	07/11/2003	8,76	3,27
Pamido	16/04/2003	11,01	13/08/2003	1,01	3,27
Sankoro	02/05/2003	11,81	24/09/2003	3,39	8,42
Sérivéri	01/06/2003	11,42	08/09/2003	2,13	9,29
Sosso	07/05/2003	12,44	09/09/2003	0,94	11,50
Tchapaissa	16/05/2003	8,00	08/09/2003	1,81	6,19
Téwamou	04/06/2003	13,99	08/09/2003	3,68	10,31

Annexe 10 : Profondeurs extrêmes (min et max en) et amplitude annuelle de la nappe phréatique à chaque point de mesure pour l'année 2004.

Localité	Date min	Min	Date max	Max	Amplitude
Ananiga	23/04/2004	12,90	17/08/2004	3,11	9,79
Babayaka	27/06/2004	10,73	07/10/2004	6,47	4,26
Béléfougou	02/06/2004	13,75	09/10/2004	3,76	9,99
Bortoko	20/06/2004	12,79	15/08/2004	7,95	4,84
Dendougou	06/05/2004	12,02	07/09/2004	2,08	9,94
Djapengou	24/05/2004	10,69	01/09/2004	2,09	8,60
Djougou	22/05/2004	7,84	07/09/2004	3,37	4,47
Founga	15/06/2004	11,80	08/10/2004	6,86	4,94
Foyo	24/03/2004	10,84	02/10/2004	1,50	9,34
Gangamou	23/06/2004	9,05	29/09/2004	4,25	4,80
Gaounga	21/05/2004	7,10	27/10/2004	4,66	2,44
Kokossika	15/05/2004	9,21	27/10/2004	2,91	6,30
Kolokondé	03/06/2004	12,22	02/10/2004	3,16	9,06
Koua	21/04/2004	12,67	05/08/2004	2,94	9,73
Kpégounou	04/05/2004	11,96	28/09/2004	5,01	6,95
Moné	08/07/2004	13,39	05/10/2004	5,21	8,18
Sankoro	15/06/2004	12,30	13/10/2004	6,30	6,00
Sérivéri	10/06/2004	11,71	24/07/2004	3,01	8,70
Sosso	17/04/2004	11,12	02/08/2004	1,81	9,31
Téwamou	20/05/2004	13,39	05/10/2004	5,21	8,18

Annexe 11 : Amplitude piézométrique moyenne annuelle, recharges (R) et coefficient de recharge (α) pour les années 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant de la Donga ; n = porosité, la pluie annuelle et l'ETP sont également indiquées.

Année hydrologique	Pluie annuelle	ETP (mm)	Amplitude piézométrique	R (n = 1%)		R (n = 5%)	
				R (mm)	α (%)	R (mm)	α (%)
2002 (mars-décembre)	1035	1226	4,5	45	4,3	225	21,7
2003	1514	1395	7,0	70	4,6	350	23,1
2004	1139	1390	5,0	50	4,4	250	21,9

Annexe 12 : Pluie annuelle, amplitude piézométrique annuelle (ΔH), recharge (R) et coefficient de recharge annuel (α) pour l'année 2004 à l'échelle du versant expérimental pour une porosité fixe de 1 %.

Puie Nalohou 1 (mm)	Pluie Nalohou 2 (mm)	Profondeur (m)	Amont			Amont			Amont		
			ΔH (m)	R (mm)	α (%)	ΔH (m)	R (mm)	α (%)	ΔH (m)	R (mm)	α (%)
603	843	10	2,8	28	4,6	2,2	22	3,6	1,1	11	1,8
		20	2,7	27	4,5	2,3	23	3,8	1,1	11	1,8

Annexe 13 : Pluie annuelle, amplitude piézométrique annuelle (ΔH), recharge (R) et coefficient de recharge annuel (α) pour l'année 2004 à l'échelle du versant expérimental pour une porosité fixe de 5 %.

Puie Nalohou 1 (mm)	Pluie Nalohou 2 (mm)	Profondeur (m)	Amont			Amont			Amont		
			ΔH (m)	R (mm)	α (%)	ΔH (m)	R (mm)	α (%)	ΔH (m)	R (mm)	α (%)
603	843	10	2,8	140	23,1	2,2	110	18,2	1,1	55	9,1
		20	2,7	135	22,3	2,3	115	19,0	1,1	55	9,1

Annexe 14 : 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 2002	OTT Thalimédes
Donga-Kolo	355931	1078274	409,90	105	03 mars 2002	OTT Thalimédes
Donga-Pont	384238	1073592	349,05	586	06 juin 1998	OTT Thalimédes

Annexe 15 : Caractéristiques des écoulements et du tarissement sur le bassin versant de la Donga et ses Deux sous-bassins (Ara-Pont et Donga-Kolo) en 2002.

Station	Écoulement haut ($Q \neq 0$)		Tarissement				
	Début	Fin	Début	Fin	$Q_{\text{début}}$ (m ³ /s)	Q_{fin} (m ³ /s)	Coef. tarissement (j^{-1})
Ara-Pont	03-sept.	20-oct.	20-oct.	31-oct.	0,20	0,02	0,19
Donga-Kolo	26-avr.	15-oct.	15-oct.	15-nov.	1,50	0,10	0,09
Donga-Pont	6-août	17-oct.	15-oct.	10-nov.	9,80	1,4	0,07

Annexe 16 : Caractéristiques des écoulements et du tarissement sur le bassin versant de la Donga et ses Deux sous-bassins (Ara-Pont et Donga-Kolo) en 2003.

Station	Écoulement hautes eaux		Tarissement				
	Début	Fin	Début	Fin	Q début (m ³ /s)	Q fin (m ³ /s)	Coef. tarissement (j ⁻¹)
Ara-Pont	25-juin	28-sept.	19-oct.	12-nov.	0,30	0,02	0,11
Donga-Kolo	22-avr.	02-oct.	18-oct.	05-déc.	0,70	0,30	0,05
Donga-Pont	29-mai	03-oct.	19-oct.	31-déc.	5,30	0,14	0,03

Annexe 17 : Caractéristiques des écoulements et du tarissement sur le bassin versant de la Donga et ses Deux sous-bassins (Ara-Pont et Donga-Kolo) en 2004.

Station	Écoulement hautes eaux		Tarissement				
	Début	Fin	Début	Fin	Q début (m ³ /s)	Q fin (m ³ /s)	Coef. tarissement (j ⁻¹)
Ara-Pont	18-juil.	26-sept.	01-oct.	23-oct.	0,16	0,02	0,11
Donga-Kolo	10-août	02-oct.	11-oct.	12-oct.	1,13	0,10	0,13
Donga-Pont	03-juil.	06-oct.	13-oct.	28-nov.	2,70	0,07	0,28

Annexe 18 : Mesures historiques de la conductivité électrique (µS/cm) dans les forages (DGH : Direction Générale de l'Hydraulique, SEH : Service des Études Hydrogéologiques et SQE : Service de la Qualité des Eaux).

Station	Date	Laboratoire	C.E.
Ananiga I	25/04/1988	DGH-SEH	370
Ananiga II	09/08/2002	DGH-SQE	378
Bortoko	16/03/1988	DGH-SEH	380
Djapengou	03/08/2002	DGH-SQE	277
Foyo	25/01/1988	DGH-SEH	310
Gaounga I	10/08/2002	DGH-SQE	1079
Gaounga II	18/02/1988	DGH-SEH	210
Gniouri	12/02/1988	DGH-SEH	230
Kokossika	27/01/1988	DGH-SEH	320
Kolokondé	08/08/2002	DGH-SQE	168
Koua	03/08/1988	DGH-SEH	230
Moné	22/01/1988	DGH-SEH	330
Sidi Kpara	03/08/2002	DGH-SQE	301

Annexe 19 : Mesures historiques des teneurs en ions majeurs (en meq/l) pour les eaux de socle (TC : Titrimétrie et Colorimétrie, TCS : Titrimétrie, Colorimétrie et Spectrométrie).

Station	Méthodes	C.E.	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	NO ₃
Ananinga I	TC	370	1,95	1,15	3,88	0,30	0,00
Ananinga II	TCS	378	1,64	0,96	4,00	0,20	0,13
Bortoko	TC	380	1,80	2,30	4,00	0,11	0,00
Djapengou	TCS	277	1,36	0,90	2,64	0,30	0,08
Foyo	TC	310	1,80	1,48	3,36	0,20	0,00
Gaounga I	TCS	1079	8,18	2,39	3,69	0,25	0,14
Gaounga II	TC	210	0,44	0,25	1,51	0,31	0,00
Gniouri	TC	230	2,30	0,91	4,00	0,11	0,00
Kokossika	TC	320	1,75	1,98	4,10	0,11	0,00
Kolokondé	TCS	168	0,68	0,40	1,75	0,20	0,00
Koua	TC	230	0,80	0,91	4,00	0,11	0,00
Moné	TC	330	1,70	1,73	4,10	0,11	0,00
Sidi Kpara	TCS	301	1,32	1,28	3,15	0,20	0,09

Annexe 20 : Précipitations échantillonnées lors des saisons pluvieuses 2003 et 2004.

Pluviomètre	Date	Hauteur (mm)
Djougou	16/02/03	11,7
Nalohou 1	16/02/03	18,8
Nalohou 2	16/02/03	20,5
Al Hamdou	30/0703	136,7
Djougou	30/0703	150,9
Foyo	30/07/03	88,5
Nalohou 2	30/07/03	110,9
Nalohou 2	31/07/03	22,5
Al Hamdou	05/09/03	32,0
Foyo	04/09/03	23,0
Nalohou 2	05/09/03	11,7
Nalohou 1	31/07/04	1,3
Nalohou 2.1	31/07/04	5,0
Nalohou 2.2	31/07/04	5,0
Nalohou 2	26/08/04	7,7
Djougou	26/08/04	15,2
foyo	26/08/04	2,2

Annexe 21 : Composition moyenne (m) des cations (meq/l) et du silicium (mg/l) dans les précipitations des saisons sèche et humide 2003 et 2004.

		Si	Ca	Mg	Na	K	NH ₄
saison sèche 2003	m		0,251	0,180	0,094	0,212	
	σ		0,114	0,118	0,063	0,094	
saison humide 2003	m	0,250	0,008	0,002	0,004	0,005	
	σ	0,110	0,002	0,001	0,001	0,003	
saison humide 2004	m		0,088	0,005	0,061	0,017	0,180
	σ		0,056	0,005	0,015	0,007	0,100

Annexe 22 : Composition moyenne (m) des anions (meq/l) dans les précipitations des saisons sèche et humide.

		HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
saison sèche	m	0,129	0,545	0,079	0,039
	σ	0,025	0,441	0,018	0,009
saison humide 2003	m	0,008	0,008	0,001	0,004
	σ	0,002	0,003	0,001	0,001
saison humide 2004	m	0,359	0,023	0,038	0,012
	σ	0,167	0,009	0,076	0,005

Annexe 23 : C.E. aux 17 puits ayant servi de base à l'analyse fréquentielle (en gras : site à faible variation saisonnière de C.E ; normal : site à forte variation saisonnière de C.E ; en italique gras : site à très forte valeur et variation saisonnière de C.E).

Stations	juil-02	févr-03	juil-03	août-03	sept-03	oct-03
Al Hamoud		140	76	91	96	76
Ananiga	257	264	263	254	156	141
Babayaka village	400	400	387	545	649	514
<i>Belefongo</i>		<i>1014</i>	<i>1116</i>	<i>1377</i>	<i>1414</i>	<i>1448</i>
Dendougou	326	286	455	693	801	767
Djakpengou		79	99	96	94	97
Djougou SRH	522	506	525	564	464	515
Founga	105	99	109	347	507	483
Foyo	187	181	185	189	77	162
Gangamou	656	661	640	670	700	658
Gniouri		291	328	694	638	689
Gountia		289	268	131	201	240
<i>Kolokonde</i>	<i>1017</i>	<i>907</i>	<i>1092</i>	<i>1472</i>	<i>1423</i>	<i>1420</i>
Koua	109	102	105	112	83	116
Kparsi		419	472	485	814	735
Kpegounou		163	199	217	284	234
Moné		114	105	130	139	147

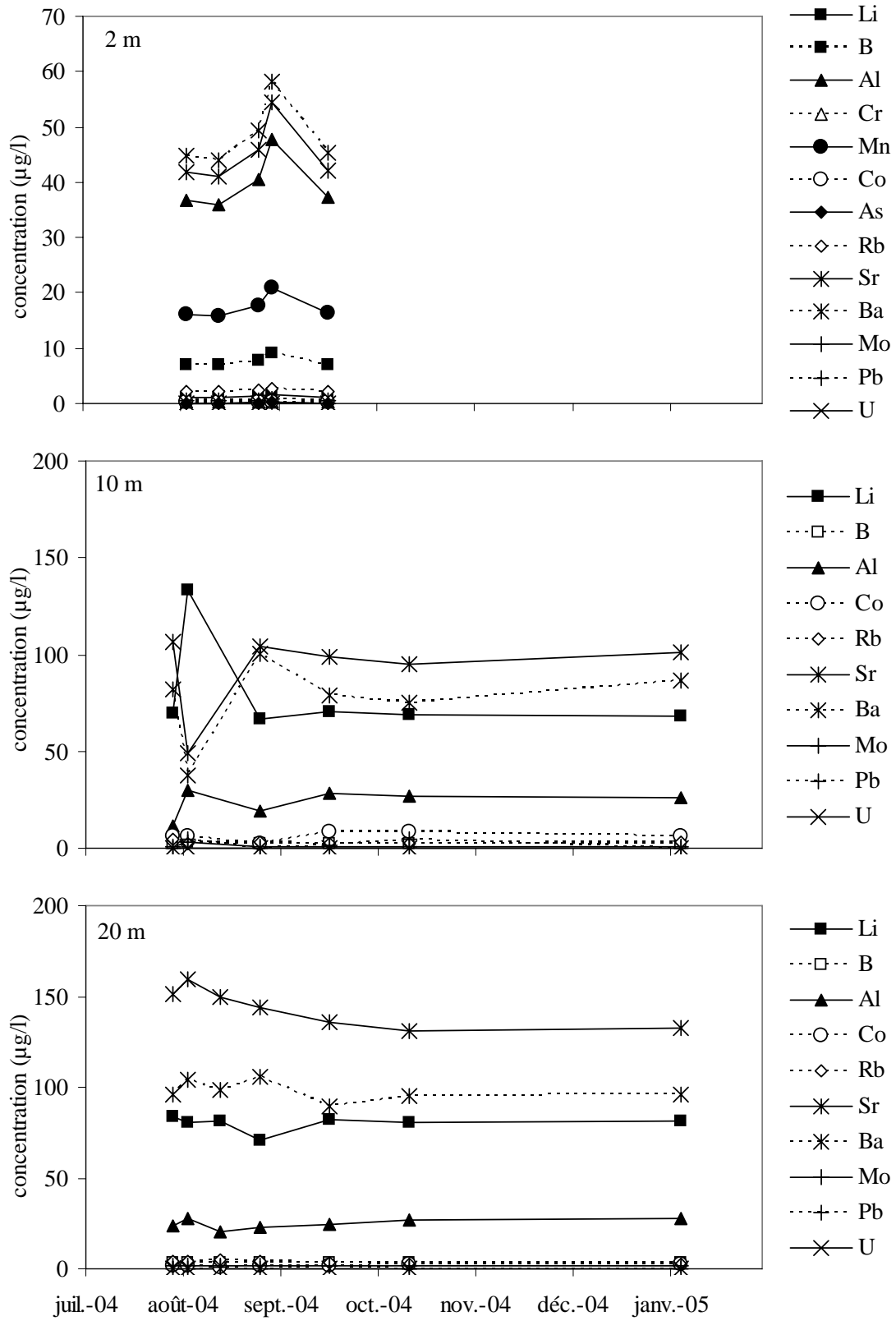
Annexe 24 : C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) aux autres puits à seulement deux mesures.

Stations	Juil-02	févr-03
Babayaka mosquée	114	-
Bortoko	263	242
CPR-Sosso	-	218
Gaounga	245	180
Kokossika	307	302
Pamido	126	118
Sankoro	202	194
Sérivéri	195	202
Tchaipassa	235	219
Tewawou	84	88

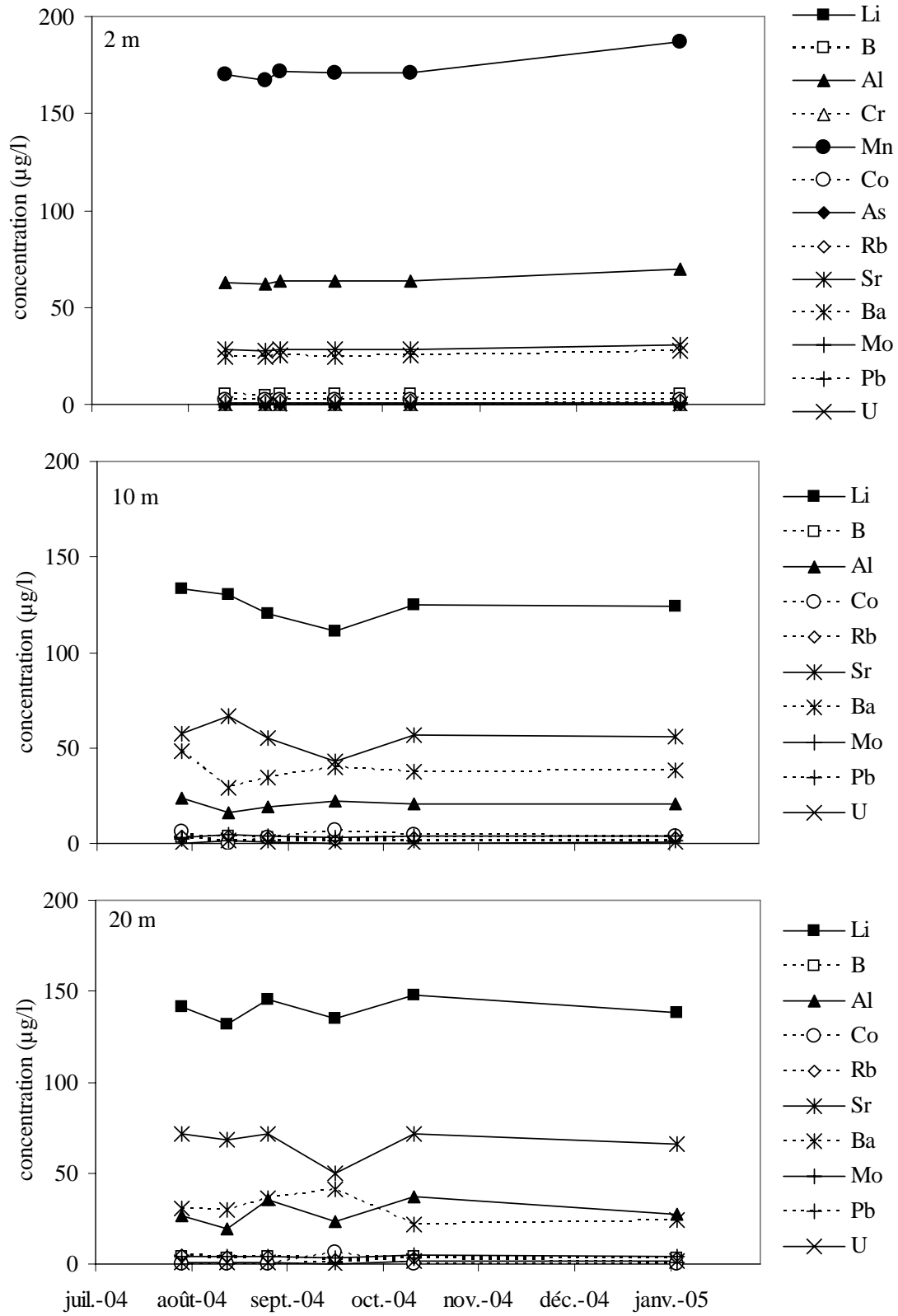
Annexe 25 : Valeurs actuelles et historiques de la C.E. dans le réservoir de socle.

Station	C.E. anciennes ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		C.E. récentes ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				
	Date	C.E.	Fév. 2003	Juil. 2003	Août 2003	Sept. 2003	Oct. 2003
Ananiga I	25/04/1988	370	374	330	335	345	338
Bortoko	16/03/1988	380					
Djapengou	03/08/2002	277	298	280	281	287	322
Foyo I	25/01/1988	310	204	304		243	272
Gaounga II	18/02/1988	210	112				
Gniouri	12/02/1988	230	264	364		360	365
Kokossika	27/01/1988	320					
Kolokondé	08/08/2002	168	141				
Koua	03/08/1988	230					
Moné	22/01/1988	330	150	148		150	152
Sidi Kpara	03/08/2002	301	297				

Annexe 26 : Concentrations des éléments traces à 2, 10 et 20 m de profondeur à la station Milieu.



Annexe 27 : Concentrations des éléments traces à 2, 10 et 20 m de profondeur à la station Aval.



Annexe 28 : Tableau récapitulatif des C.E. ponctuelles réalisées à Ara-Pont et du choix des écoulements de base (en gras).

Date	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$Q_{\text{instantané}}$ (m^3/s)	$Q_{\text{h-12}}$ (m^3/s)	Q_{jour} (m^3/s)	$Q_{\text{h+12}}$ (m^3/s)
27/07/03 13:25	43	0,170	0,157	0,173	1,198
30/08/03 13:15	33	0,641	0,647	5,901	2,210
01/09/03 13:15	33	2,241	2,210	1,803	1,600
02/09/03 18:15	32	1,754	1,803	1,600	2,498
03/09/03 14:30	33	1,583	1,600	2,498	0,624
04/09/03 11:00	26	1,682	2,498	0,624	5,252
13/09/03 18:23	34	0,242	0,275	7,424	0,733
16/09/03 10:40	32	0,399	0,407	0,300	3,172
18/09/03 14:50	33	0,252	3,172	0,686	0,451
02/10/03 11:45	43	0,156	0,192	0,160	0,150
16/11/03 10:30	40	0,000	0,017	0,000	0,002
20/07/04 12:54	39	0,800	0,719	0,801	0,364
23/07/04 12:55	38	0,120	0,365	0,273	0,185
26/07/04 13:40	38	0,240	0,175	0,142	0,132
29/07/04 17:57	42	0,100	0,104	1,157	1,195
08/08/04 17:00	43	0,180	0,262	0,154	0,431
21/08/04 09:07	40	0,140	0,148	0,151	0,132
15/09/04 08:57	37	0,160	0,166	0,259	0,268
07/10/04 12:52	36	0,120	0,127	0,110	0,141
29/10/04 10:57	37	0,000	0,000	0,000	0,000

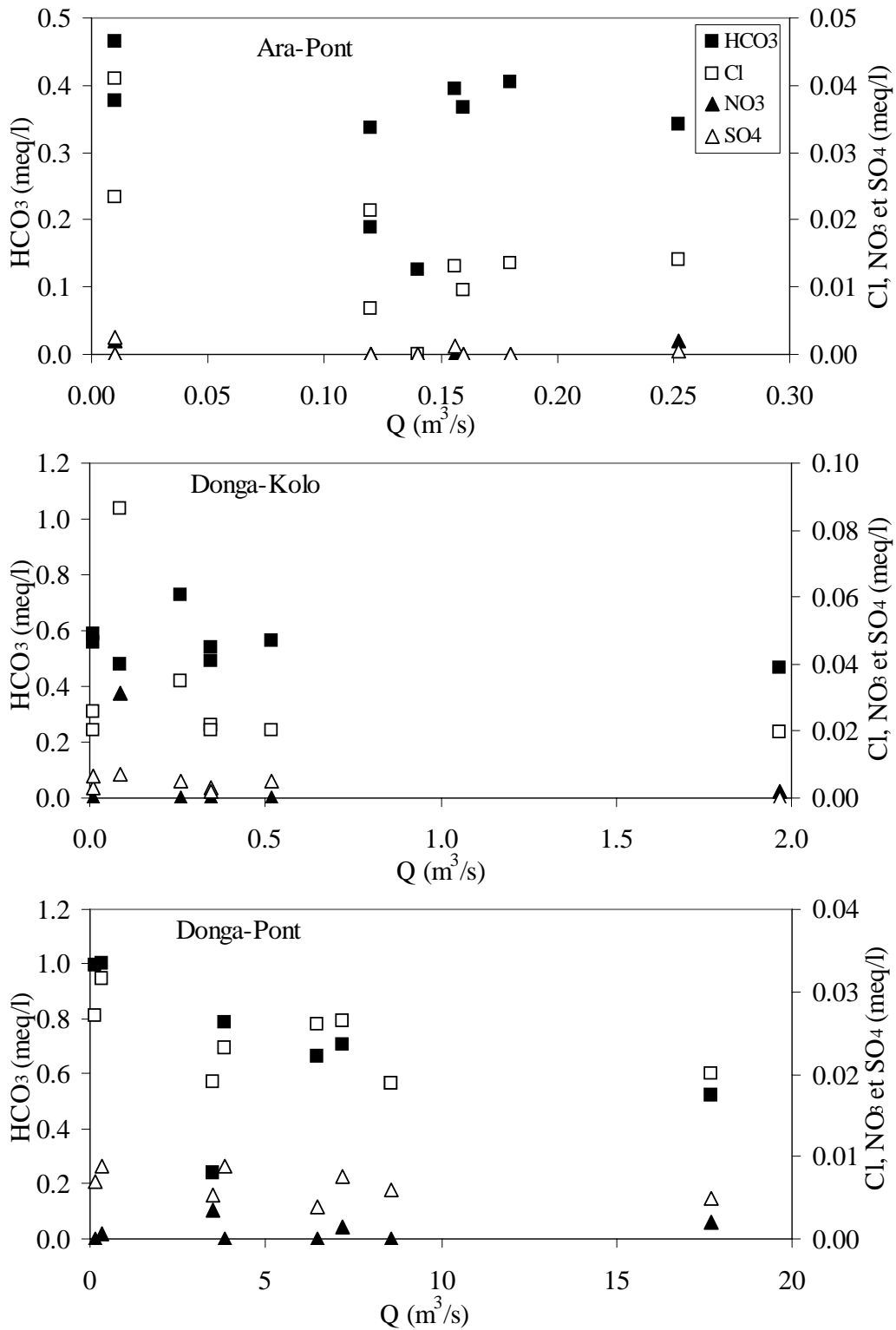
Annexe 29 : Tableau récapitulatif des C.E. ponctuelles réalisées à Donga-Kolo et du choix des débits de base (en gras).

Date	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$Q_{\text{instantané}}$ (m^3/s)	$Q_{\text{jour-1}}$ (m^3/s)	Q_{jour} (m^3/s)	$Q_{\text{jour+1}}$ (m^3/s)
28/07/03 13:37	58	1,005	0,660	0,388	0,315
31/08/03 10:25	46	7,460	7,346	34,480	7,329
01/09/03 12:35	46	7,090	34,480	7,329	4,333
03/09/03 12:00	45	3,308	4,333	3,102	12,060
06/09/03 11:17	52	3,973	4,793	11,450	15,870
18/09/03 09:45	49	1,967	2,458	4,405	4,545
09/10/03 12:35	61	0,520	0,418	0,260	0,260
16/11/03 08:50	67	0,260	0,260	0,260	0,260
23/07/04 13:55	48	0,087	0,087	0,644	0,160
26/07/04 12:30	56	0,000	0,091	0,000	0,000
29/07/04 10:52	62	0,000	0,000	0,000	0,160
10/08/04 09:20	51	0,000	0,000	0,166	1,179
21/08/04 09:37	49	0,347	0,378	0,347	0,543
16/09/04 10:21	62	0,780	0,619	0,653	0,981
07/10/04 10:50	53	0,347	0,347	0,347	0,347
29/10/04 11:40	62	0,000	0,000	0,000	0,000

Annexe 30 : Tableau récapitulatif des C.E. ponctuelles réalisées à Donga-pont et du choix des débits de base (en gras).

Date	C.E. (µS/cm)	Q _{instantané} (m ³ /s)	Q _{jour-1} (m ³ /s)	Q _{jour} (m ³ /s)	Q _{jour+1} (m ³ /s)
23/07/03 11:20	52	9,740	6,624	7,794	6,119
25/07/03 11:25	34	12,158	6,119	8,061	5,945
29/07/03 17:10	50	5,638	8,105	6,152	8,309
30/07/03 19:10	58	8,362	8,309	39,320	94,490
11/08/03 11:47	41	35,292	30,700	32,810	60,870
12/08/03 03:30	36	47,220	32,810	60,870	103,000
31/08/03 14:55	40	96,331	40,630	92,910	143,000
03/09/03 18:00	60	27,110	55,190	29,060	28,310
04/09/03 20:00	43	34,720	29,060	28,310	47,360
13/09/03 10:48	58	22,868	22,200	21,790	15,020
15/09/03 18:30	31	30,793	15,020	20,540	19,980
16/09/03 17:45	59	17,700	20,540	19,980	12,490
08/10/03 16:50	67	7,204	7,201	8,492	5,866
16/11/03 08:50	106	0,350	0,453	0,373	0,316
17/07/04 16:27	62	3,445	2,599	4,655	6,326
23/07/04 16:45	68	3,512	8,916	4,009	19,240
26/07/04 16:09	65	6,173	10,660	5,964	5,797
29/07/04 16:50	63	6,220	8,564	7,009	5,363
10/08/04 13:16	68	5,193	6,250	5,292	11,290
21/08/04 12:52	70	8,576	16,940	17,160	17,930
20/09/04 15:30	102	6,485	6,580	6,580	7,593
09/10/04 14:15	73	3,852	4,255	3,818	3,407
27/10/04 16:30	102	0,161	0,246	0,176	0,062

Annexe 31 : Teneurs des anions dans les débits de base à Ara-Pont, Donga-Kolo et Donga-Pont.



Annexe 32 : Caractéristiques des évènements de crues pour chacune des 3 stations.

Évènement	Lame précipitée sur Ara-Pont	Durée (hh : mm)	Lame écoulee (mm)		
			Ara-Pont	Donga-Kolo	Donga-Pont
Crue 1 (31/07/2003)	180,5	08 : 13	40,0	35,0	26,9
Crue 2 (12/08/2003)	51,2	01 : 48	2,9	6,6	51,8
Crue 3 (04/09/2003)	20,5	01 : 48	5,5	10,2	9,4

Annexe 33 : Composition moyenne (m) et écart-type (σ) des cations (meq/l) et du silicium (mg/l) dans les précipitations des saisons humide 2003 et 2004.

		Si	Ca	Mg	Na	K
saison humide 2003	m	0,250	0,008	0,002	0,004	0,005
	σ	0,110	0,002	0,001	0,001	0,003
saison humide 2004	m		0,088	0,005	0,061	0,017
	σ		0,056	0,005	0,015	0,007

Annexe 34 : Composition moyenne (m) et écart-type (σ) des anions (meq/l) dans les précipitations des saisons sèche et humide.

		HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
saison humide 2003	m	0,008	0,008	0,001	0,004
	σ	0,002	0,003	0,001	0,001
saison humide 2004	m	0,359	0,023	0,038	0,012
	σ	0,167	0,009	0,076	0,005

Annexe 35 : Composition moyenne (m) et écart-type (σ) éléments traces (μ g/l) caractéristiques des précipitations.

	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	As	Rb	Sr	Ba	Mo	Pb	U
m	0,11	4,27	36,33	1,29	54,83	2,21	0,04	1,24	9,93	41,59	0,04	201,07	0,01
σ	0,04	1,75	38,86	0,09	5,20	0,10	0,01	0,33	1,59	2,37	0,02	0,34	0,00

Annexe 36 : Composition moyenne (m) et écart-type (σ) en éléments majeurs (meq/l) dans les réservoirs d'altérites (groupe A).

		Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
saison sèche 2003	m	0,67	0,51	0,40	0,10	1,52	0,04	0,07	0,01
	σ	0,39	0,41	0,12	0,05	0,85	0,08	0,11	0,01
saison humide 2003	m	0,84	0,25	0,23	0,11	1,01	0,14	0,23	0,02
	σ	0,53	0,21	0,11	0,06	0,45	0,11	0,26	0,01

Annexe 37 : Composition moyenne (m) et écartype (σ) en éléments traces ($\mu\text{g/l}$) dans les réservoirs d'altérites (groupe A).

		Li	B	Al	Cr	Mn	Co	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
saison sèche 2003	m	4,33	2,09	45,62	2,10	38,94	0,56	0,09	5,41	105,80	0,17	97,16	0,21	0,03
	σ	2,85	0,46	58,38	1,91	82,37	0,99	0,07	5,22	59,84	0,34	84,64	0,20	0,03
saison humide 2003	m		6,20	41,71	0,79	5,80	0,17	0,11	6,60	141,56	0,10	106,95	0,07	0,16
	σ		4,78	22,44	0,38	4,74	0,11	0,10	2,96	139,88	0,14	87,70	0,06	0,38

Annexe 38 : Composition (m) et écartype (σ) en éléments majeurs (meq/l) dans les réservoirs de socle.

		Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
saison sèche 2003	m	1,38	0,99	0,59	0,11	2,88	0,19	0,08	0,03
	σ	0,52	0,42	0,12	0,03	1,12	0,23	0,13	0,03
saison humide 2003	m	1,14	0,88	0,52	0,12	2,51	0,05	0,05	0,02
	σ	0,29	0,28	0,11	0,03	0,73	0,06	0,09	0,02

Annexe 39 : Composition (m) et écartype (σ) en éléments traces ($\mu\text{g/l}$) dans les réservoirs de socle.

		Li	B	Al	Cr	Mn	Co	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
saison sèche 2003	m	10,87	2,87	12,99	0,98	107,23	0,37	0,11	0,96	167,12	0,96	112,83	0,06	0,34
	σ	6,31	1,66	19,50	1,20	105,51	0,50	0,12	0,54	57,89	0,82	59,59	0,05	0,24
saison humide 2003	m		1,49	8,46	0,75	162,60	0,51	0,20	0,81	149,02	0,81	104,88	0,07	0,21
	σ		0,61	3,40	0,98	181,22	0,61	0,32	0,42	56,72	0,61	56,45	0,09	0,28

Annexe 40 : Conductivité électrique moyenne en fonction de la profondeur sur les stations expérimentaux Amont, Milieu et Aval.

Profondeur (m)	Amont	Milieu	Aval
2	66,7 \pm 22,1	73,9 \pm 14,3	78,3 \pm 13,1
10	166,7 \pm 7,8	173,3 \pm 24,7	203,5 \pm 15,7
20	186,5 \pm 5,3	224,6 \pm 35,4	248,0 \pm 27,7

Annexe 41 : Concentrations moyennes en éléments majeurs et écart-type à la station expérimental Amont ; Si est exprimé en mg/l et les autres en meq/l.

Profondeur (m)	Si	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
2	23,00	0,22	0,10	0,12	0,06	0,42	0,05	0,01	0,01
	3,73	0,16	0,06	0,04	0,02	0,19	0,02	0,02	0,01
10	152,88	0,49	0,41	0,79	0,06	1,47	0,24	0,00	0,01
	2,61	0,15	0,07	0,14	0,02	0,35	0,03	0,00	0,01
20	141,89	0,57	0,47	0,83	0,12	1,73	0,19	0,00	0,02
	2,87	0,06	0,05	0,06	0,01	0,13	0,03	0,01	0,02

Annexe 42 : Concentrations moyennes et écart-type ($\mu\text{g/l}$) en éléments traces à la station expérimental Amont.

Profondeur (m)	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
2	1,62	3,51	103,23	0,23	65,59	1,32	0,12	1,46	115,65	0,06	108,50	2,76	0,03
	0,24	0,52	15,21	0,03	9,67	0,20	0,02	0,22	17,04	0,01	15,99	0,41	0,00
10	63,11	11,97	32,18		686,15	2,30		2,03	192,49	10,68	241,02	1,14	0,15
	9,15	2,23	10,13		204,42	2,33		0,65	4,75	2,18	14,68	0,55	0,12
20	33,08	4,80	20,86		424,20	4,58		1,83	162,09	8,99	77,02	0,92	0,13
	3,69	0,37	2,18		19,44	0,64		0,37	2,90	1,31	8,77	1,34	0,06

Annexe 43 : Concentrations moyennes et écart-type en éléments majeurs à la station expérimental Milieu ; Si est exprimé en mg/l et les autres en meq/l.

Profondeur (m)	Si	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
2	34,10	0,29	0,08	0,26	0,04	0,48	0,04	0,08	0,04
	2,57	0,14	0,04	0,03	0,01	0,12	0,01	0,08	0,02
10	146,16	0,40	0,34	0,66	0,12	1,41	0,09	0,00	0,01
	1,96	0,01	0,02	0,01	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00
20	152,83	0,71	0,58	0,70	0,16	1,87	0,16	0,00	0,01
	0,78	0,05	0,03	0,02	0,01	0,09	0,02	0,00	0,00

Annexe 44 : Concentrations moyennes et écart-type ($\mu\text{g/l}$) en éléments traces à la station expérimental Milieu.

Profondeur (m)	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
2	1,26	7,55	39,66	0,21	17,37	0,17	0,12	2,30	45,06	0,13	48,34	0,64	0,01
	0,16	0,93	4,87	0,03	2,13	0,02	0,01	0,28	5,53	0,02	5,94	0,08	0,00
10	79,47	2,32	23,65		272,66	6,26		3,03	92,32	1,31	76,74	1,85	0,01
	26,50	0,44	7,01		38,14	2,13		0,76	21,56	0,99	21,13	2,08	0,01
20	80,00	3,32	24,68		355,76	1,71		3,65	143,33	1,66	97,83	0,45	0,05
	4,18	0,17	2,77		38,81	0,47		0,67	10,69	0,11	5,57	0,42	0,03

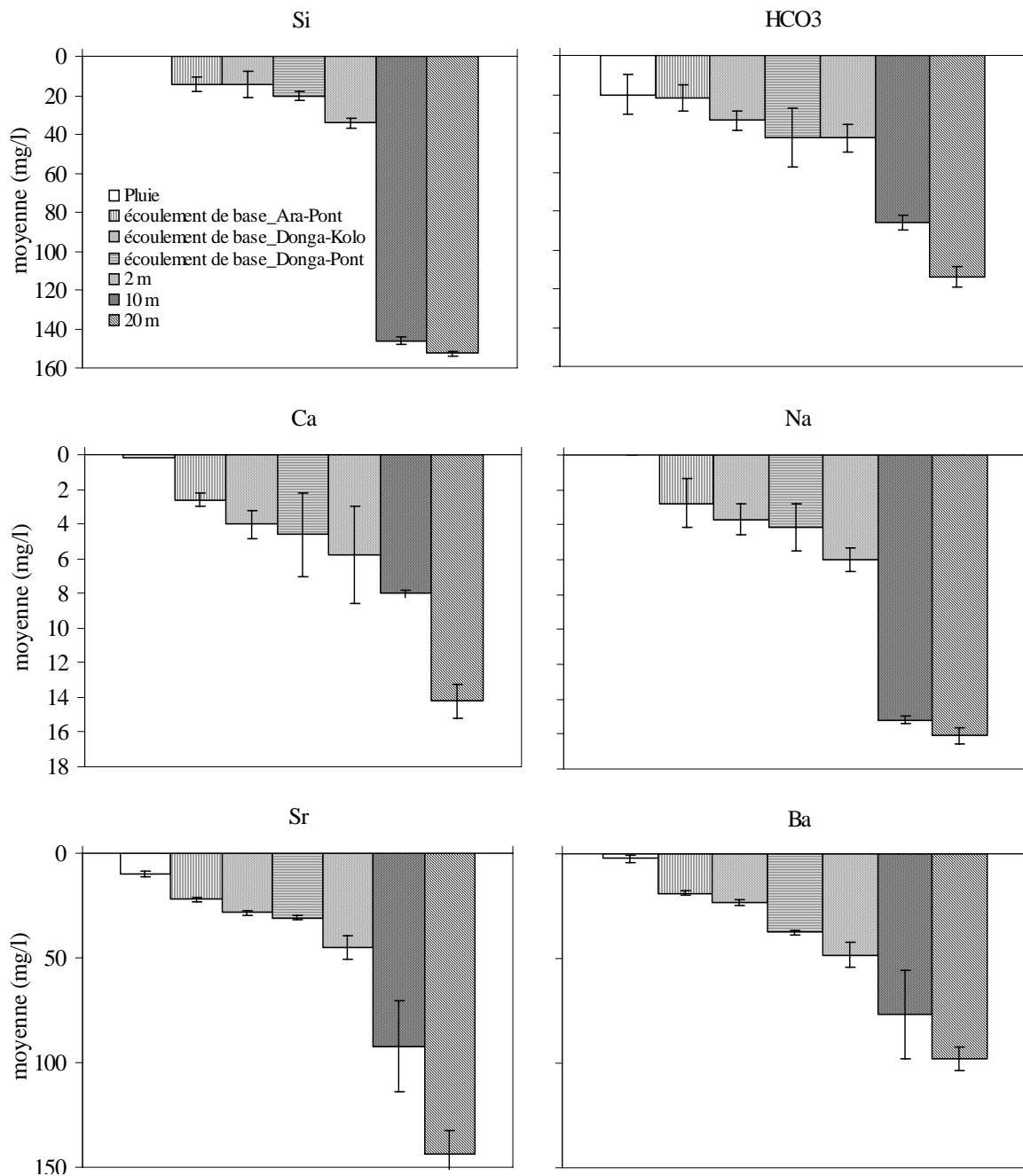
Annexe 45 : Concentrations moyennes et écart-type en éléments majeurs à la station expérimental Aval ; Si est exprimé en mg/l et les autres en meq/l.

Profondeur (m)	Si	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
2	67,21	0,20	0,05	0,45	0,02	0,69	0,02	0,00	0,01
	52,22	0,21	0,02	0,03	0,01	0,15	0,01	0,00	0,00
10	146,93	0,37	0,43	1,02	0,12	1,82	0,05	0,00	0,05
	1,58	0,03	0,04	0,02	0,01	0,17	0,01	0,00	0,00
20	135,03	0,97	0,82	0,93	0,09	2,73	0,07	0,00	0,04
	4,46	0,23	0,15	0,04	0,09	0,40	0,01	0,00	0,01

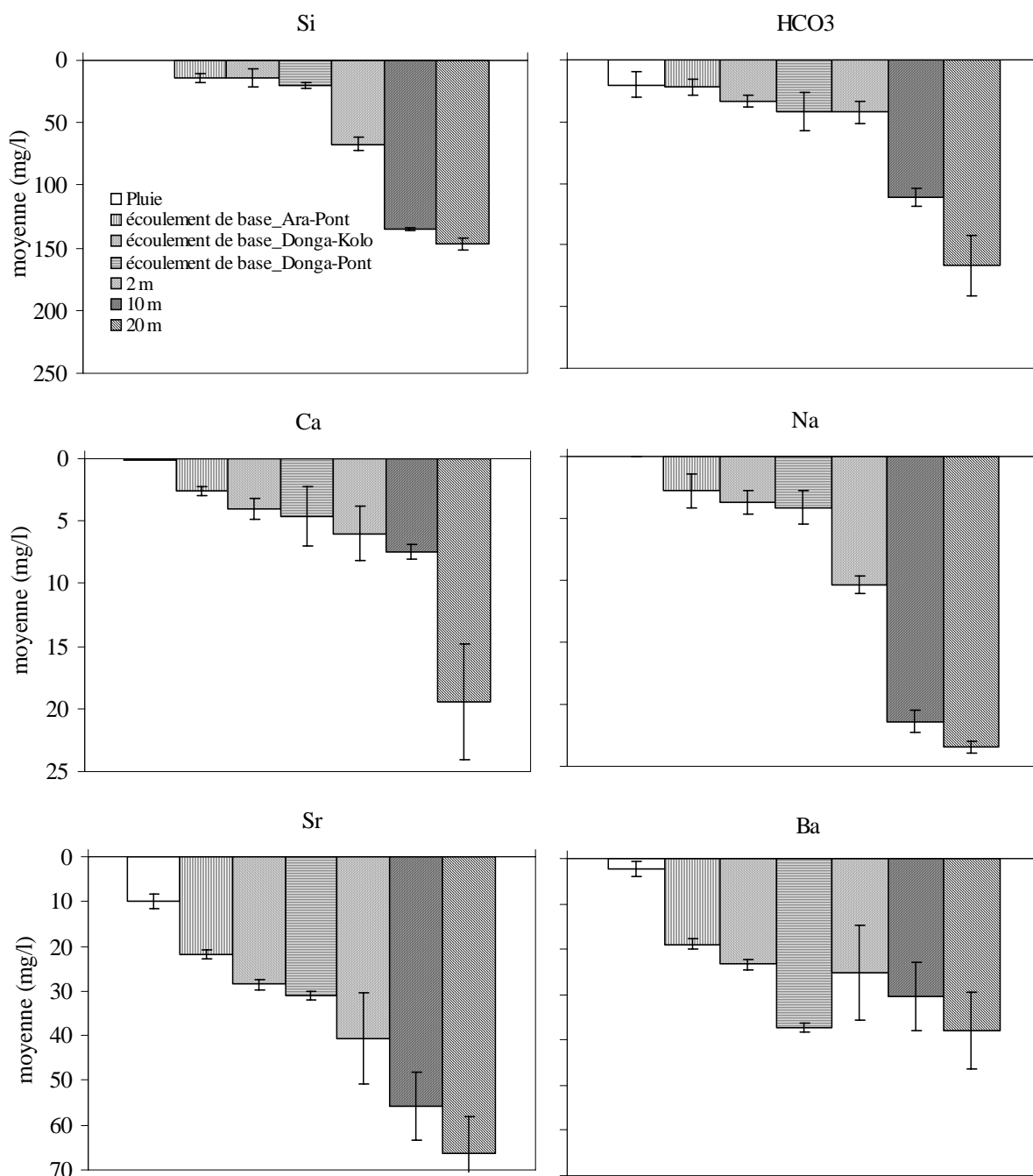
Annexe 46 : Concentrations moyennes et écart-type ($\mu\text{g/l}$) en éléments traces à la station expérimental Aval.

Profondeur (m)	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
2	0,83	5,08	64,15	0,24	172,97	2,13	0,17	2,00	28,45	0,22	25,18	0,36	0,02
	0,03	0,21	2,66	0,01	7,16	0,09	0,01	0,08	1,18	0,01	1,04	0,01	0,00
10	123,89	3,18	20,65		240,30	4,10		3,04	55,89	3,66	37,97	1,79	0,50
	7,86	0,39	2,68		86,88	2,28		0,78	7,55	0,44	6,17	0,29	0,50
20	139,86	3,56	28,31		128,05	1,18		3,55	66,51	4,04	30,46	0,90	1,04
	6,08	0,28	6,70		120,48	2,39		0,90	8,49	0,46	7,11	1,06	0,59

Annexe 47 : Composition chimique caractéristique des pluies, des écoulements de base, des réservoirs d'altérites à 2, 10 et 20 m à la station Milieu.



Annexe 48 : Composition chimique caractéristique des pluies, des écoulements de base, des réservoirs d'altérites à 2, 10 et 20 m à la station Aval.



Annexe 49 : Concentrations moyennes en éléments majeurs des écoulements de base ; Si est exprimé en mg/l et les autres en meq/l.

	Si	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄
Ara-Pont	14,34 ±	0,13 ±	0,08 ±	0,12 ±	0,02 ±	0,33 ±	0,02 ±	0,00 ±	0,00 ±
(n = 9)	3,86	0,02	0,03	0,06	0,01	0,11	0,01	0,00	0,00
Donga-Kolo	20,37 ±	0,23 ±	0,17 ±	0,16 ±	0,04 ±	0,55 ±	0,03 ±	0,00 ±	0,00 ±
(n = 8)	2,30	0,04	0,03	0,04	0,02	0,08	0,02	0,00	0,00
Donga-Pont	14,50 ±	0,30 ±	0,23 ±	0,18 ±	0,03 ±	0,69 ±	0,02 ±	0,01 ±	0,00 ±
(n = 8)	7,00	0,12	0,09	0,06	0,01	0,25	0,00	0,00	0,00

Annexe 50 : Éléments majeurs servant à la déconvolution des hydrogrammes et compositions moyennes caractéristiques (mg/l) dans les compartiments considérés (m : moyenne et σ : écart-type), C_r^i et C_l^i sont respectivement les concentration du traceur i dans le ruissellement rapide et dans l'écoulement lent.

				Si	Ca	Na	HCO ₃
Ara-Pont	Crue 1	C_r : Pluie (n = 15)	m	0,04	0,16	0,09	0,49
			σ	0,02	0,04	0,02	0,12
		C_l : Amont_2m (n =4)	m	23,00	4,41	2,76	25,63
			σ	3,73	3,21	0,92	11,59
	Crue 2	C_r : Pluie (n = 15)	m	0,04	0,16	0,09	0,49
			σ	0,02	0,04	0,02	0,12
		C_l : Écoulement de base (n = 9)	m	9,85	2,55	1,56	20,26
			σ	0,71	0,78	0,43	6,65
Donga –Kolo		C_r : Pluie (n = 15)	m	0,04	0,16	0,09	0,49
			σ	0,02	0,04	0,02	0,12
		C_l : Écoulement de base (n = 8)	m	10,14	4,03	2,26	32,52
			σ	0,75	0,74	0,96	4,79
Donga-Pont	Crue 1	C_r : Pluie (n = 15)	m	0,04	0,16	0,09	0,49
			σ	0,02	0,04	0,02	0,12
		C_l : Amont_2m (n = 4)	m	23,00	4,41	2,76	25,63
			σ	3,73	3,21	0,92	11,59
	Crue 2	C_r : Pluie (n = 15)	m	0,04	0,16	0,09	0,49
			σ	0,02	0,04	0,02	0,12
		C_l : Écoulement de base (n = 8)	m	14,00	7,07	4,13	41,90
			σ	1,44	2,42	1,34	15,49
	Crue 3	C_r : Pluie (n = 15)	m	0,04	0,16	0,09	0,49
			σ	0,02	0,04	0,02	0,12
		C_l : Écoulement de base (n = 8)	m	14,00	7,07	4,13	41,90
			σ	1,44	2,42	1,34	15,49

Annexe 51 : Éléments traces servant à la déconvolution des hydrogrammes et compositions moyennes caractéristiques ($\mu\text{g/l}$) dans les compartiments considérés (m : moyenne et σ : écart-type), C_r^i et C_l^i sont respectivement les concentration du traceur i dans le ruissellement rapide et dans l'écoulement lent.

				Sr	Ba
Ara-Pont	Crue 1	C_r : Pluie (n = 3)	M	0,04	0,16
			σ	0,02	0,04
		C_l : Écoulement de base (n = 9)	m	21,89	18,86
			σ	1,26	1,09
	Crue 2	C_r : Pluie (n = 3)	m	0,04	0,16
			σ	0,02	0,04
		C_l : Écoulement de base (n = 5)	m	21,89	18,86
			σ	1,26	1,09
Donga -Kolo		C_r : Pluie (n = 3)	m	0,04	0,16
			σ	0,02	0,04
		C_l : Écoulement de base (n = 8)	m	26,43	5,52
			σ	7,90	0,78
Donga-Pont	Crue 1	C_r : Pluie (n = 3)	m	0,04	0,16
			σ	0,02	0,04
		C_l : Aval_2m (n = 4)	m	28,45	25,18
			σ	1,18	1,04
	Crue 2	C_r : Pluie (n = 3)	m	0,04	0,16
			σ	0,02	0,04
		C_l : Aval_2m (n = 4)	m	28,45	25,18
			σ	1,18	1,04
	Crue 3	C_r : Pluie (n = 3)	m	0,04	0,16
			σ	0,02	0,04
		C_l : Écoulement de base (n = 8)	m	55,59	37,38
			σ	16,37	6,83

Annexe 52 : Paramètres physico-chimiques des pluies échantillonnées.

Période	Station	Hauteur	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	O ₂ (%)
févr-03	Djougou	15,2	195	5,2	26,6	68,3
	Kopargo	18,5	50	5,6	29,4	65,2
	Naholou	20,5	118	5,0	30,7	75,0
juil-02	Babayaka	4,00	11	6,8	30,7	98,5
	Birni		16	5,9	28,1	94,2
	Koparko		9	6,1	27,3	94,6
juil-03	Al Hamoud	136,7	12	6,9	30,1	87,0
	Djougou	150,9	11	6,8	31,9	77,6
	Foyo	88,5	9	7,1	25,8	76,9
	Nalohou	110,9	13	7,5	23,6	86,4
août-03	Al Hamoud	72,5	10	6,9	25,7	92,0
	Djougou	80,0	8	7,3	29,2	78,0
	Foyo	42,3	9	7,3	23,7	80,5
	Nalohou	57,3	11	7,3	28,8	84,0
	Foyo	37,1	8	7,2	28,0	88,0
juil.-04	Foyo	15,5	12	7,0	26,7	93,0
	Nalohou	13,5	9	7,4	28,1	88,0
août-04	Nalohou 2.1	19,4	10	7,2	25,7	82,5
	Nalohou 2.2	22,5	10	7,4	28,8	84,0
	Nalohou 2.3	24,1	8	7,1	28,0	89,0
	Nalohou 2.4	27,0	8	7,1	27,7	87,0

Annexe 53 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) des pluies.

Période	Station	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Si
févr-03	Djougou	0,13	1,02	0,10	0,04	0,36	0,30	0,17	0,32	
	Kopargo	0,16	0,45	0,06	0,05	0,26	0,17	0,06	0,17	
	Naholou	0,11	0,16	0,07	0,03	0,13	0,07	0,06	0,15	
juil-02	Babayaka	0,10	0,00	0,01	0,00	0,07	0,00	0,00	0,05	0,38
	Birni	0,06	0,04	0,01	0,00	0,07	0,00	0,00	0,05	0,18
	Koparko	0,07	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00	0,00	0,04	0,19
juil-03	Al Hamoud	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04
	Djougou	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02
	Foyo	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02
	Nalohou	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
juil.-04	Al Hamoud	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02
	Foyo	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,09
	Foyo	0,23	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	
	Nalohou	0,17	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	
août-04	Nalohou 2.1	0,14	0,02	0,33	0,01	0,05	0,00	0,04	0,02	
	Nalohou 2.2	0,16	0,03	0,19	0,01	0,05	0,01	0,05	0,02	
	Nalohou 2.3	0,15	0,05	0,34	0,02	0,07	0,01	0,07	0,03	
	Nalohou 2.4	0,19	0,04	0,22	0,01	0,06	0,01	0,05	0,03	

Annexe 54 : Concentrations en éléments traces (en µg/l) des pluies.

Périodes	Station	Li	B	Al	Cr	Mn
févr-03	Djougou	0,44	14,90	131,93	1,56	158,49
	Kopargo	0,25	17,55	152,53	3,03	88,49
	Naholou	0,25	9,20	81,89	0,47	50,39
juil.-04	Foyo	0,02	2,51	23,44	0,04	5,78
	Nalohou	0,06	0,99	54,28	0,13	4,62

Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr
5,03	123,46	21187,00	1798,30	0,11	5,02	33,93
1,98	1873,60	6741,50	1386,10	0,18	4,42	23,96
0,73	16,76	2530,60	1100,10	0,12	2,64	14,07
0,11	0,13	0,23	4924,90	0,01	0,43	2,10
0,10	0,51	0,44	1638,90	0,01	0,23	1,08

Mo	Cs	Ba	Pb	U
0,06	0,05	132,35	433,74	0,04
0,11	0,05	96,92	576,39	0,02
0,04	0,02	49,46	179,44	0,02
0,02		2,93	0,50	0,00
0,01		1,81	0,17	0,00

Annexe 55 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en juillet 2002.

Type	Station	Date	C.E (µS/cm)	pH	T (°C)	O ₂ (%)
PUITS	Ananiga	28/07/02 11:40	257	6,8	28,5	69,7
	Babayaka	29/07/02 14:27	400	5,9	28,2	70,8
	Bortoko	28/07/02 16:05	263	6,8	28,7	61,5
	Dendougou	28/07/02 09:05	326	7,0	27,0	52,7
	Djougou SRH	28/07/02 07:49	522	6,8	27,4	61,2
	Founga	29/07/02 08:15	105	5,3	27,2	79,2
	Foyo	28/07/02 13:18	187	7,4	27,8	95,2
	Gangamou	28/07/02 17:05	656	6,3	28,4	60,5
	Kokossika	28/07/02 15:15	307	7,0	28,4	39,5
	Kolokondé	28/07/02 18:47	1017	6,6	27,9	57,2
	Koua	29/07/02 16:46	109	6,8	28,4	63,9
	Pamido	29/07/02 09:35	126	6,6	27,8	67,3
	Sangkoro	28/07/02 17:52	202	6,8	29,1	80,5
	Sérivéri	28/07/02 10:24	195	6,7	28,3	69,6
	Tchaipassa	28/07/02 09:45	235	7,0	27,9	65,9
Tewawou	28/07/02 16:30	84	6,1	28,9	75,1	
FORAGE	Ananiga	28/07/02 12:22	332	6,7	28,7	26,9

Annexe 56 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en février 2003.

Type	Station	Date	C.E. (µS/cm)	pH	T (°C)	O ₂ (%)
PUITS	Al Hamoud	11/02/03 08:40	140	6,9	26,8	56,3
	Ananinga	08/02/03 09:35	264	7,1	25,7	67,3
	Babayaka mosq.	09/02/03 18:22	114	6,2	28,0	63,4
	Babayaka village	09/02/03 18:05	400	6,0	27,3	67,2
	Béléfongo	11/02/03 14:10	1014	7,2	28,9	38,9
	Bortoko	12/02/03 16:04	242	6,8	29,3	58,2
	CPR-Sosso	12/02/03 09:47	218	7,3	27,8	54,9
	Dendougou	06/02/03 10:41	286	6,8	26,0	45,6
	Djakpengou	11/02/03 10:10	79	6,5	28,7	51,0
	Djougou-SRH	05/02/03 15:00	506	6,7	28,0	63,0
	Founga	09/02/03 16:15	99	5,3	28,0	70,0
	Foyo	07/02/03 14:25	181	7,3	26,4	81,4
	Gangamou	12/02/03 14:35	661	6,4	29,0	49,5
	Gaounga	08/02/03 12:37	180	6,7	25,1	15,5
	Gniouri	13/02/03 10:57	291	6,8	28,2	48,9
	Koko-sika	08/02/03 15:10	302	6,9	28,5	47,6
	Kolokondé	12/02/03 10:47	907	6,4	29,4	42,2
	Koua	06/02/03 15:49	102	6,5	27,7	78,0
	Kparsi	11/02/03 11:34	419	7,7	27,2	62,9
	Kpégounou	11/02/03 16:35	163	6,3	29,5	46,1
	Kountia	13/02/03 15:35	289	7,1	29,3	60,5
	Moné mosquée	07/02/03 10:53	114	6,1	28,9	59,2
	Moné village	07/02/03 10:10	298	6,4	26,3	64,5
	Pamido	05/02/03 16:53	118	6,4	28,4	58,1
	Sankoro	12/02/03 12:51	194	6,5	29,4	50,7
	Sériveri	06/02/03 14:07	202	6,4	28,1	56,0
Tchakpaissa	06/02/03 12:30	219	6,7	27,4	56,1	
Téwamou	12/02/03 15:30	88	6,2	29,9	54,4	
FORAGE	Al Hamoud	11/02/03 08:40	140	6,9	26,8	56,3
	Ananinga1	07/02/03 11:54	374	6,7	29,1	23,5
	Ananinga2	07/02/03 12:30	334	6,6	29,4	32,0
	Béléfongo	11/02/03 16:00	539	6,3	33,9	33,6
	Djapengou	11/02/03 10:47	298	7,3	29,6	24,7
	Foyo1	08/02/03 10:20	204	6,4	28,0	52,9
	Foyo2	08/02/03 10:50	306	6,7	29,1	23,6
	Foyo3	08/02/03 11:30	275	6,7	28,5	28,5
	Gaounga	08/02/03 14:13	112	6,0	29,4	27,3
	Gniouri	13/02/03 11:37	264	6,4	29,9	22,9
	Kolokondé	12/02/03 12:00	141	6,1	29,5	19,7
	Kparsi	11/02/03 12:15	416	6,9	29,8	19,0
	Kpégounou	11/02/03 17:10	259	6,6	29,5	30,4
	Moné	07/02/03 09:50	150	6,1	28,2	47,8

Annexe 57 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en juillet 2003.

Type	Station	Date	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	O ₂ (mg/l)
PUITS	Al Hamoud	08/07/03 11:00	76	28,7	6,0	2,9
	Ananina	06/07/03 13:28	263	28,0	7,1	4,3
	Babayaka	07/07/03 10:30	387	28,0	5,8	4,2
	Barié	07/07/03 13:44	552	27,7	6,7	2,6
	Barié nou	09/07/03 9:58	296	28,4	6,9	4,2
	Béléfoungo	08/07/03 15:50	1116	28,2	7,2	3,8
	Dendougou	06/07/03 17:37	455	27,3	6,9	2,5
	Djapengou	08/07/03 11:30	99	27,6	6,3	4,6
	Founga	07/07/03 13:15	109	28,0	5,1	4,5
	Foyo	06/07/03 12:50	185	27,2	7,2	4,6
	Gangamou	08/07/03 18:33	640	28,2	6,3	3,4
	Gniouri	09/07/03 13:05	328	28,3	6,6	5,3
	Kolokondé	08/07/03 17:32	1092	28,2	6,4	3,7
	Koua	06/07/03 16:36	105	28,6	6,3	3,7
	Kountia	09/07/03 12:00	268	29,5	7,1	5,0
	Kparsi	08/07/03 12:55	472	27,7	7,0	3,8
	Kpégounou	08/07/03 17:02	199	29,1	6,3	4,5
	Moné	06/07/03 15:42	105	29,3	5,7	3,2
	Nodiangu	09/07/03 10:50	124	28,2	5,3	3,6
	Pabégou	07/07/03 11:00	51	28,0	5,9	4,5
Sérétiouri	08/07/03 14:15	320	28,0	7,0	2,8	
Soubroukou	07/07/03 15:36	84	28,9	6,7	4,7	
FORAGE	Ananina	06/07/03 14:55	330	29,1	6,6	1,5
	Djapengou	08/07/03 15:15	280	28,7	7,0	1,7
	Foyo	06/07/03 12:10	304	29,1	6,5	1,7
	Gniouri	09/07/03 13:20	364	28,8	6,7	1,8
	Kparsi	08/07/03 13:15	384	28,9	6,7	1,9
	Kpégounou	08/07/03 16:50	225	29,5	6,3	1,8
	Moné	06/07/03 15:20	148	29,5	5,8	2,6
Nodiangu	09/07/03 10:35	311	29,2	6,7	2,0	

Annexe 58 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en août 2003.

Type	Station	Date	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	O ₂ (mg/l)
	Al Hamoud	09/08/03 10:08	91	28,7	6,2	2,3
	Ananina	08/08/03 15:10	254	28,6	6,4	4,0
	Babayaka	10/08/03 16:45	545	27,4	7,3	4,4
	Baréi	10/08/03 10:15	559	28,1	6,7	2,8
	Barié nou	08/08/03 11:27	283	28,8	7,0	3,4
	Béléfoungo	09/08/03 13:45	1377	29,3	7,2	3,9

PUITS	Dendougou	08/08/03 10:00	693	27,0	6,6	1,8
	Djapengou	09/08/03 10:33	96	27,7	6,2	3,6
	Founga	11/08/03 09:50	347	28,1	6,4	3,1
	Gangamou	10/08/03 14:15	670	28,4	6,2	3,0
	Gniouri	08/08/03 17:15	694	28,2	6,7	2,6
	Kolokondé	09/08/03 15:25	1472	27,7	6,6	3,4
	Koua	08/08/03 11:27	112	28,1	6,3	3,7
	Kountia	08/08/03 12:14	131	30,7	5,6	3,1
	Kparsi	09/08/03 12:00	485	28,6	6,9	3,2
	Kpégounou	09/08/03 14:54	217	28,5	6,5	4,1
	Pabégou	10/08/03 17:20	72	28,1	6,1	3,4
	Sérétiouri	10/08/03 15:35	349	28,2	6,8	1,5
	Soubroukou	08/08/03 18:25	44	28,4	5,3	2,8
	FORAGE	Ananiga	08/08/03 15:25	335	28,9	6,5
Djapengou		09/08/03 11:15	281	31,0	6,9	1,5
Foyo		08/08/03 14:26	304	30,0	6,4	1,2
Kparsi		09/08/03 12:14	371	29,8	6,7	0,9
Kpégounou		09/08/03 14:30	217	29,4	6,5	2,8
Moné		08/08/03 15:50	148	29,2	5,8	2,8
Nodianguï		08/08/03 13:15	314	29,9	6,7	1,4

Annexe 59 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en septembre 2003.

Type	Station	Date	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	O ₂ (mg/l)
PUITS	Al Hamoud	13/09/03 10:15	96	27,0	6,3	1,3
	Ananiga	15/09/03 18:05	156	27,6	5,9	2,6
	Babayaka	12/09/03 18:05	649	27,1	6,8	3,5
	Barié	16/09/03 10:00	716	27,8	6,5	2,7
	Bariénou	15/09/03 16:20	209	28,1	7,1	2,4
	Béléfoungo	13/09/03 11:20	1414	28,7	7,3	3,0
	Dendougou	12/09/03 10:30	801	26,5	6,7	1,7
	Djapengou	12/09/03 15:25	94	27,4	6,2	2,4
	Djoungou	16/09/03 12:10	464	28,1	6,8	3,1
	Founga	16/09/03 10:40	507	27,4	6,4	2,6
	Foyo	13/09/03 16:25	77	27,7	5,8	1,7
	Gangamou	13/09/03 15:10	700	28,5	6,5	2,5
	Gniouri	12/09/03 14:00	638	28,1	6,6	2,2
	Kolokondé	13/09/03 14:17	1423	29,4	6,9	3,1
	Koua	12/09/03 11:35	83	28,0	6,2	2,1
	Kountia	12/09/03 12:55	201	28,3	6,3	2,5
	Kparsi	12/09/03 16:30	814	27,6	7,0	2,5
	Kpégounou	13/09/03 12:07	284	29,5	6,7	2,2
	Moné	15/09/03 17:30	139	28,5	5,8	3,0
	Nalohou	10/09/03 18:30	395	27,7	6,1	3,0

	Nodiangui	15/09/03 16:45	41	28,2	5,2	1,8
	Kpabégou	16/09/03 10:55	85	29,2	6,3	3,7
	Sérétiouri	16/09/03 11:40	304	27,9	7,0	1,3
	Soubroukou	16/09/03 09:10	46	27,8	5,3	2,6
FORAGE	Al Hamoud	13/09/03 10:25	298	28,5	6,9	2,3
	Ananina	15/09/03 17:50	345	28,1	6,6	2,5
	Béléfoungo	13/09/03 11:45	542	29,1	7,1	1,9
	Djapengou	12/09/03 14:55	287	28,4	7,1	2,5
	Foyo	13/09/03 16:45	243	29,2	6,4	2,6
	Gniouri	12/09/03 14:20	360	29,0	6,8	2,2
	Kparsi	12/09/03 16:45	362	27,6	7,0	3,0
	Kpégounou	13/09/03 12:28	227	30,8	6,5	2,2
	Moné	15/09/03 17:40	150	28,3	5,9	2,5
	Nodiangui	15/09/03 16:55	319	28,2	6,5	2,3

Annexe 60 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en octobre 2003.

Type	Station	Date	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	O ₂ (mg/l)
PUITS	Al Hamoud	03/10/03 16:06	76	28,0	6,5	3,0
	Ananina	07/10/03 10:50	141	29,1	6,5	2,9
	Babayaka	02/10/03 15:50	514	28,9	7,1	3,8
	Barié	07/10/03 18:05	806	27,7	7,0	3,0
	Bariénou	30/09/03 14:45	186	28,4	7,3	2,7
	Béléfoungo	07/10/03 15:45	1448	29,2	7,7	3,7
	Dendougou	30/09/03 13:35	767	27,3	7,3	2,4
	Djapengou	02/10/03 17:45	97	27,1	6,9	3,2
	Founga	07/10/03 18:30	483	27,3	7,0	2,8
	Foyo	07/10/03 10:05	162	28,2	6,1	1,9
	Gangamou	07/10/03 14:05	658	28,8	6,7	3,2
	Gniouri	01/10/03 10:30	689	28,1	7,2	2,7
	Kolokondé	07/10/03 15:10	1420	29,1	7,2	3,4
	Koua	07/10/03 11:50	116	28,8	6,7	3,3
	Kountia	30/09/03 16:30	240	29,5	7,7	2,7
	Kpabégou	02/10/03 16:30	99	28,2	6,7	3,7
	Kpégounou	01/10/03 17:40	234	29,1	6,8	3,4
	Moné	01/10/03 09:05	147	28,9	6,2	3,0
	Nalohou II	08/10/03 10:10	292	27,8	6,6	3,2
	Sérétiouri	08/10/03 12:00	308	27,5	7,5	1,8
Soubroukou	08/10/03 09:25	80	27,5	6,3	2,8	
FORAGE	Al Hamdou	07/10/03 16:40	315	28,8	7,4	3,0
	Ananina	01/10/03 11:40	338	28,8	7,1	2,8
	Belefoungou	07/10/03 16:10	578	29,5	7,5	1,9
	Djapengou	02/10/03 18:50	322	28,6	7,5	1,6
	Foyo	07/10/03 09:35	272	28,4	6,9	2,9

Gniouri	01/10/03 10:55	365	29,0	7,2	2,1
Kpars	02/10/03 12:50	357	28,0	7,1	2,0
Kpégounou	01/10/03 18:05	245	29,4	6,9	2,5
Moné	01/10/03 09:55	152	29,1	6,3	2,9
Nodiangu	30/09/03 17:30	420	29,5	7,7	2,4

Annexe 61 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en octobre 2004.

Type	Station	Date	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)
Puits	Al Hamoud	08/10/04 09:38	82	26,9
	Ananina	09/10/04 14:05	115	28,2
	Babayaka village	07/10/04 16:18	465	27,8
	Babayaka mosq.	07/10/04 16:40	166	27,5
	Baréi	07/10/04 15:32	773	27,4
	Bariéno	09/10/04 09:33	216	28,1
	Béléfoungo	08/10/04 13:20	1349	28,4
	Dendougou	09/10/04 08:55	673	26,6
	Djapengou	08/10/04 10:08	87	26,8
	Djougu	07/10/04 10:10	442	28,1
	Founga	07/10/04 15:15	126	28,1
	Foyo	13/09/03 16:25	77	27,7
	Gangamou	08/10/04 17:35	634	28,1
	Gniouri	09/10/04 15:40	562	27,6
	Kolokondé	08/10/04 14:45	1400	28,5
	Koua	09/10/04 10:35	109	28,0
	Kountia	09/10/04 11:15	278	29,3
	Kpabégou	07/10/04 17:00	55	28,9
	Kpars	07/10/04 17:36	270	28,5
	Kpégounou	08/10/04 13:56	177	28,6
	Moné	09/10/04 13:10	125	29,0
	Nalohou	10/09/03 18:30	395	27,7
	Nodiangu	15/09/03 16:45	41	28,2
	Pamido	08/10/04 08:20	97	27,4
Sérétiouri	07/10/04 18:25	138	27,4	
Soubroukou	07/10/04 09:30	86	28,1	
Forage	Al Hamoud	08/10/04 09:50	284	28,2
	Ananina	09/10/04 13:50	336	29,8
	Béléfoungo	08/10/04 13:20	518	28,8
	Djapengou	08/10/04 10:08	312	29,3
	Foyo	09/10/04 14:20	244	30,4
	Gniouri	09/10/04 12:30	362	28,7
	Kpars	07/10/04 17:42	210	28,6
	Kpégounou	08/10/04 13:56	240	29,2
	Moné	09/10/04 13:25	152	29,4

Annexe 62 : Paramètres physico-chimiques dans les nappes d'altérites (puits) et de socle en juillet 2004

Type	Station	Date	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
Puits	Babayaka village	17/07/04 11:00	442	24,8	6,5
	Babayaka mosquée	17/07/04 11:30	106	24,8	6,0
	Béléfoungo	17/07/04 13:45	1021	24,8	7,5
	Dendougou	17/07/04 11:45	292	26,5	7,2
	Foyo	17/07/04 16:05	164	27,7	7,1
	Kolokondé	17/07/04 14:55	1188	29,4	6,9
	Kokossika	17/07/04 17:10	289	29,0	7,2
	Moné	17/07/04 15:10	103	28,5	5,9
Forage	Béléfoungo	17/07/04 14:15	493	29,1	7,1
	Foyo	17/07/04 15:45	273	29,2	6,7
	Kokossika	17/07/04 16:55	295	29,2	7,0

Annexe 63 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en juillet 2002.

Type	Station	Date	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Si
PUITS	Ananinga	28/07/02 11:40	2,30	0,01	0,03	0,00	1,23	1,00	0,54	0,09	37,17
	Babayaka	29/07/02 14:27	1,89	0,38	0,68	0,02	0,70	0,44	0,43	1,74	
	Bortoko	28/07/02 16:05	2,29	0,13	0,00	0,00	1,21	0,90	0,63	0,09	43,41
	Dendougou	28/07/02 09:05	2,64	0,24	0,06	0,02	1,62	1,10	0,62	0,10	38,40
	Djoungou	28/07/02 07:49	1,25	1,22	0,68	0,02	1,38	1,54	1,36	0,46	8,51
	Founga	29/07/02 08:15	0,13	0,12	0,44	0,00	0,24	0,18	0,15	0,23	4,57
	Foyo	28/07/02 13:18	1,68	0,00	0,00	0,00	0,73	0,53	0,64	0,11	43,32
	Gangamou	28/07/02 17:05	1,55	1,04	2,30	0,19	1,55	2,34	0,90	0,51	14,31
	Kokossika	28/07/02 15:15	3,26	0,00	0,00	0,00	1,54	1,33	0,57	0,08	40,34
	Kolokonde	28/07/02 18:47	2,20	1,60	1,72	0,05	4,07	2,18	1,75	0,85	19,28
	Koua	29/07/02 16:46	1,24	0,00	0,00	0,00	0,51	0,23	0,23	0,12	23,00
	Pamido	29/07/02 09:35	1,20	0,04	0,05	0,00	0,50	0,23	0,57	0,01	38,85
	Sangkoro	28/07/02 17:52	1,99	0,00	0,00	0,00	1,04	0,70	0,33	0,12	31,15
	Sérivéri	28/07/02 10:24	1,87	0,00	0,00	0,00	0,93	0,57	0,48	0,07	
	Tchaipassa	28/07/02 09:45	1,90	0,12	0,05	0,00	1,17	0,63	0,60	0,07	31,73
Tewawou	28/07/02 16:30	0,98	0,00	0,01	0,00	0,32	0,34	0,14	0,06	18,39	
FORAGE	Ananinga	28/07/02 12:22	3,25	0,00	0,00	0,00	1,52	1,17	0,68	0,11	39,46

**Annexe 65 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l) dans les nappes d'altérites
(puits) et de socle (forage) en juillet 2003.**

Type	Station	Date	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K
PUITS	Al Hamoud	08/07/03 11:00	0,50	0,08	0,12	0,00	0,37	0,16	0,14	0,09
	Ananina	06/07/03 13:28	2,46	0,00	0,01	0,01	1,25	0,86	0,52	0,19
	Babayaka	07/07/03 10:30	0,55	0,84	1,54	0,10	0,78	0,31	0,45	1,54
	Barié	07/07/03 13:44	3,08	1,02	0,74	0,27	2,76	0,98	0,71	1,28
	Bariénou	09/07/03 9:58	2,68	0,03	0,00	0,01	1,25	1,13	0,49	0,13
	Béléfoungo	08/07/03 15:50	7,15	1,03	1,85	0,46	2,83	2,65	0,88	4,78
	Dendougou	06/07/03 17:37	3,18	0,71	0,25	0,10	2,07	1,34	0,82	0,21
	Djapengou	08/07/03 11:30	0,70	0,08	0,10	0,00	0,55	0,12	0,27	0,05
	Founga	07/07/03 13:15	0,57	0,02	0,05	0,00	0,43	0,25	0,15	0,17
	Foyo	06/07/03 12:50	1,98	0,02	0,00	0,00	0,72	0,49	0,63	0,07
	Gangamou	08/07/03 18:33	1,58	1,20	2,48	0,05	1,69	2,29	1,03	0,77
	Gniouri	09/07/03 13:05	2,23	0,40	0,47	0,10	1,35	1,22	0,54	0,12
	Kolokondé	08/07/03 17:32	2,33	3,40	3,67	0,00	4,25	2,26	1,92	0,96
	Koua	06/07/03 16:36	1,00	0,01	0,00	0,00	0,47	0,23	0,23	0,11
	Kountia	09/07/03 12:00	3,92	0,01	0,00	0,04	2,38	1,11	0,43	0,13
	Kpars	08/07/03 12:55	2,80	0,53	0,61	0,24	2,06	1,82	0,79	0,07
	Kpégounou	08/07/03 17:02	1,27	0,22	0,25	0,00	1,11	0,37	0,35	0,16
	Moné	06/07/03 15:42	0,63	0,05	0,25	0,00	0,32	0,12	0,39	0,14
	Nodiangu	09/07/03 10:50	0,20	0,24	0,51	0,00	0,30	0,37	0,25	0,13
	Pabégou	07/07/03 11:00	0,48	0,02	0,07	0,00	0,34	0,03	0,06	0,09
Sérétiouri	08/07/03 14:15	3,53	0,21	0,01	0,11	2,64	0,35	0,74	0,23	
Soubroukou	07/07/03 15:36	0,74	0,05	0,02	0,00	0,36	0,29	0,21	0,04	
FORAGE	Ananina	06/07/03 14:55	3,40	0,01	0,00	0,00	1,52	1,14	0,72	0,11
	Djapengou	08/07/03 15:15	2,43	0,34	0,00	0,01	1,38	0,76	0,55	0,14
	Foyo	06/07/03 12:10	2,73	0,06	0,06	0,04	1,21	1,06	0,66	0,10
	Gniouri	09/07/03 13:20	3,93	0,01	0,00	0,00	1,96	1,44	0,44	0,06
	Kpars	08/07/03 13:15	2,88	0,59	0,08	0,10	1,85	1,31	0,63	0,09
	Kpégounou	08/07/03 16:50	2,13	0,08	0,00	0,00	1,05	0,75	0,42	0,14
	Moné	06/07/03 15:20	1,01	0,01	0,23	0,00	0,54	0,33	0,45	0,10
Nodiangu	09/07/03 10:35	3,03	0,01	0,00	0,00	1,06	1,84	0,32	0,11	

**Annexe 66 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l) dans les nappes d'altérites
(puits) et de socle (forage) en août 2003.**

Type	Station	Date	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K
PUITS	Al Hamoud	09/08/03 10:08	0,65	0,09	0,11	0,01	0,50	0,16	0,12	0,10
	Ananinga	08/08/03 15:10	1,35	0,41	0,53	0,04	1,33	0,64	0,44	0,12
	Babayaka	10/08/03 16:45	2,58	0,92	1,20	0,40	1,84	0,86	0,60	1,77
	Baréi	10/08/03 10:15	2,94	1,07	0,70	0,38	2,47	0,92	0,74	1,25
	Bariénou	08/08/03 11:27	2,83	0,05	0,02	0,03	1,39	1,14	0,49	0,13
	Béléfoungo	09/08/03 13:45	3,27	2,38	2,64	0,91	1,66	2,01	1,37	4,51
	Dendougou	08/08/03 10:00	3,84	1,21	0,97	0,37	3,01	1,67	1,16	1,19
	Djapengou	09/08/03 10:33	0,73	0,10	0,12	0,02	0,57	0,07	0,26	0,04
	Founga	11/08/03 09:50	1,47	0,61	0,99	0,16	1,49	0,53	0,53	0,72
	Gangamou	10/08/03 14:15	1,29	1,64	2,33	0,32	1,72	2,50	1,37	0,62
	Gniouri	08/08/03 17:15	4,55	0,68	1,04	0,34	3,23	1,84	0,66	1,40
	Kolokondé	09/08/03 15:25	1,95	5,79	4,02	0,59	5,38	2,79	3,41	2,01
	Koua	08/08/03 11:27	1,20	0,01	0,00	0,01	0,60	0,24	0,27	0,11
	Kountia	08/08/03 12:14	0,78	0,10	0,30	0,02	0,54	0,21	0,15	0,15
	Kparsi	09/08/03 12:00	3,48	1,13	0,88	0,64	2,03	2,34	0,96	1,28
	Kpégounou	09/08/03 14:54	1,41	0,29	0,40	0,01	1,30	0,45	0,33	0,07
	Pabégou	10/08/03 17:20	0,60	0,03	0,08	0,01	0,55	0,02	0,07	0,08
	Sérétiouri	10/08/03 15:35	3,33	0,22	0,01	0,11	2,54	0,33	0,74	0,24
Soubroukou	08/08/03 18:25	0,23	0,06	0,11	0,00	0,18	0,13	0,10	0,01	
FORAGE	Ananinga	08/08/03 15:25	3,85	0,02	0,00	0,02	1,71	1,34	0,78	0,10
	Djapengou	09/08/03 11:15	2,87	0,40	0,00	0,05	1,47	0,88	0,60	0,14
	Foyo	08/08/03 14:26	1,77	0,18	0,31	0,03	0,93	0,76	0,67	0,14
	Kparsi	09/08/03 12:14	3,73	0,61	0,02	0,08	1,86	1,29	0,67	0,08
	Kpégounou	09/08/03 14:30	2,20	0,07	0,00	0,00	1,11	0,75	0,45	0,13
	Moné	08/08/03 15:50	1,41	0,03	0,21	0,00	0,59	0,35	0,51	0,09

**Annexe 67 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l) dans les nappes d'altérites
(puits) et de socle (forage) en septembre 2003.**

Type	Station	Date	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K
PUITS	Al Hamoud	13/09/03 10:15	0,96	0,03	0,01	0,01	0,63	0,17	0,09	0,13
	Ananinga	15/09/03 18:05	1,08	0,15	0,28	0,03	0,74	0,37	0,26	0,15
	Babayaka	12/09/03 18:05	3,03	0,72	1,38	0,47	2,47	1,37	0,51	1,90
	Barié	16/09/03 10:00	3,07	1,50	1,33	0,62	3,02	1,32	1,00	1,49
	Bariénou	15/09/03 16:20	1,62	0,25	0,07	0,03	1,48	0,42	0,23	0,06
	Béléfoungo	13/09/03 11:20	3,42	2,44	2,86	0,98	1,99	2,18	1,57	4,31
	Dendougou	12/09/03 10:30	6,53	0,76	0,70	0,42	3,01	1,73	1,52	2,13
	Djapengou	12/09/03 15:25	0,67	0,13	0,14	0,02	0,60	0,07	0,24	0,05
	Djoungou	16/09/03 12:10	2,13	1,18	0,44	0,41	1,83	0,91	1,16	0,44
	Founga	16/09/03 10:40	1,86	0,91	1,25	0,42	2,22	0,78	0,62	0,87
	Foyo	13/09/03 16:25	0,54	0,16	0,05	0,01	0,30	0,18	0,26	0,03
	Gangamou	13/09/03 15:10	2,13	1,79	2,43	0,32	1,70	2,60	1,54	0,66

	Gniouri	12/09/03 14:00	4,73	0,64	1,38	0,31	2,84	1,41	0,57	1,50
	Kolokondé	13/09/03 14:17	2,73	4,91	4,99	0,62	5,71	2,06	2,74	2,40
	Koua	12/09/03 11:35	0,69	0,07	0,03	0,03	0,59	0,11	0,14	0,05
	Kountia	12/09/03 12:55	1,93	0,08	0,17	0,03	1,71	0,21	0,12	0,11
	Kpégounou	13/09/03 12:07	1,35	0,39	0,80	0,03	1,62	0,71	0,35	0,13
	Moné	15/09/03 17:30	0,87	0,12	0,36	0,01	0,50	0,17	0,40	0,22
	Nodianguï	15/09/03 16:45	0,30	0,07	0,03	0,00	0,11	0,12	0,10	0,05
	Kpabégou	16/09/03 10:55	0,75	0,03	0,09	0,01	0,71	0,02	0,08	0,09
	Sérétiouri	16/09/03 11:40	3,27	0,10	0,00	0,05	2,40	0,43	0,33	0,16
	Soubroukou	16/09/03 09:10	0,36	0,05	0,08	0,00	0,19	0,14	0,11	0,01
FORAGE	Al Hamoud	13/09/03 10:25	3,27	0,02	0,00	0,09	1,25	0,79	1,13	0,13
	Ananina	15/09/03 17:50	4,20	0,02	0,00	0,02	1,71	1,34	0,78	0,10
	Béléfoungo	13/09/03 11:45	3,15	0,71	0,00	0,22	2,06	1,27	0,92	0,14
	Djapengou	12/09/03 14:55	2,87	0,40	0,00	0,05	1,47	0,88	0,60	0,14
	Foyo	13/09/03 16:45	1,77	0,18	0,31	0,03	0,93	0,76	0,67	0,14
	Gniouri	12/09/03 14:20	4,00	0,02	0,00	0,00	2,02	1,55	0,48	0,06
	Kparsi	12/09/03 16:45	3,73	0,61	0,02	0,08	1,86	1,29	0,67	0,08
	Kpégounou	13/09/03 12:28	2,20	0,07	0,00	0,00	1,11	0,75	0,45	0,13
	Moné	15/09/03 17:40	1,41	0,03	0,21	0,00	0,59	0,35	0,51	0,09

Annexe 68 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l) dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en octobre 2003.

Type	Station	Date	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K
PUITS	Al Hamoud	03/10/03 16:06	0,54	0,05	0,04	0,01	0,36	0,14	0,12	0,08
	Ananina	07/10/03 10:50	1,02	0,08	0,12	0,02	0,69	0,32	0,22	0,12
	Babayaka	02/10/03 15:50	2,70	0,63	0,87	0,42	1,75	0,88	0,44	1,69
	Barié	07/10/03 18:05	2,88	1,73	1,66	0,81	3,17	1,51	1,10	1,61
	Béléfoungo	07/10/03 15:45	5,13	1,03	1,42	0,51	0,81	2,03	1,54	4,96
	Djapengou	02/10/03 17:45	0,63	0,10	0,13	0,02	0,58	0,06	0,21	0,04
	Founga	07/10/03 18:30	1,95	0,80	1,17	0,39	2,20	0,70	0,61	0,78
	Foyo	07/10/03 10:05	1,02	0,28	0,22	0,00	0,47	0,34	0,33	0,13
	Gangamou	07/10/03 14:05	0,30	1,58	2,35	0,32	1,63	2,52	1,35	0,62
	Gniouri	01/10/03 10:30	4,17	0,82	1,14	0,33	3,33	1,69	0,68	1,36
	Kolokondé	07/10/03 15:10	1,05	4,75	4,73	0,67	5,43	2,03	2,78	2,50
FORAGE	Al Hamdou	07/10/03 16:40	3,27	0,02	0,00	0,08	1,24	0,80	1,11	0,13
	Ananina	01/10/03 11:40	3,23	0,02	0,00	0,02	1,63	1,27	0,76	0,10
	Belefoungo	07/10/03 16:10	3,84	0,69	0,00	0,21	1,93	1,27	0,83	0,13
	Djapengou	02/10/03 18:50	2,55	0,33	0,00	0,10	1,50	0,90	0,61	0,14
	Gniouri	01/10/03 10:55	4,28	0,11	0,00	0,05	2,05	1,52	0,47	0,03

**Annexe 69 : Concentrations en éléments traces (µg/l) dans les nappes d'altérites (puits)
et de socle (forage) en juillet 2002.**

Type	Station	Date	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	Ni
PUITS	Ananinga	28/07/02 11:40	2,75	1,54	3,03	0,33	12,02	0,13	0,95
	Babayaka	29/07/02 14:27	8,65	9,05	41,65	2,34	57,77	2,31	4,04
	Bortoko	28/07/02 16:05	11,36	1,79	1,83	0,87	4,92	0,07	0,38
	Dendougou	28/07/02 09:05	5,65	2,12	1,41	0,87	35,66	0,09	0,79
	Djoukou SRH	28/07/02 07:49	0,89	6,51	10,55	0,43	1,24	0,10	1,63
	Founga	29/07/02 08:15	6,47	2,36	99,01	0,44	93,06	5,21	9,07
	Foyo	28/07/02 13:18	5,50	1,40	12,00	2,22	1,03	0,06	0,69
	Gangamou	28/07/02 17:05	4,99	2,74	7,31	4,99	10,82	0,72	9,43
	Kokossika	28/07/02 15:15	14,10	2,13	6,60	0,18	57,64	0,35	0,35
	Kolokonde	28/07/02 18:47	6,35	7,18	12,93	0,86	238,87	1,87	2,23
	Koua	29/07/02 16:46	3,16	1,90	2,15	3,39	7,48	0,13	4,31
	Pamido	29/07/02 09:35	0,37	1,50	21,08	2,47	2,00	0,07	0,49
	Sangkoro	28/07/02 17:52	9,91	6,86	2,83	1,37	15,09	0,28	2,97
	Sérivéri	28/07/02 10:24	2,90	2,13	7,09	0,33	40,89	0,63	1,67
	Tchaipassa	28/07/02 09:45	1,68	2,08	2,14	0,84	4,75	0,06	0,11
Tewawou	28/07/02 16:30	1,90	1,34	3,94	26,60	10,15	0,48	19,51	
FORAGE	Ananinga	28/07/02 12:22	7,85	2,58	2,48	0,48	76,53	0,21	1,57

Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Cs	Ba	Pb	U
0,28	1,33	0,06	0,41	90,27	1,00	0,01	31,63	0,06	0,07
19,69	15,93	0,20	27,40	81,49	0,05	1,02	215,75	0,19	0,02
0,25	2,25	0,40	0,84	169,33	1,08	0,01	84,38	0,05	0,05
0,43	3,66	0,11	1,38	190,11	0,22	0,00	83,59	0,04	0,06
0,51	20,66	0,34	28,91	281,82	0,05	1,76	426,91	0,15	0,02
9,09	24,47	0,09	20,61	38,93	0,01	1,72	292,12	0,27	0,16
0,55	1,57	0,05	0,35	170,56	0,10	0,01	123,64	0,06	0,02
1,65	24,70	0,22	40,86	659,55	0,13	3,68	534,90	0,16	0,14
0,42	2,36	0,06	0,62	163,24	0,86	0,01	116,98	0,03	0,57
0,83	6,07	0,46	11,15	874,18	0,27	0,03	1370,10	0,10	0,68
0,30	625,39	0,06	7,76	73,53	0,05	0,04	74,36	0,05	0,01
0,30	75,54	0,20	0,57	83,11	0,08	0,01	49,07	0,02	0,01
1,26	4,07	0,17	0,74	160,93	0,26	0,03	135,92	0,12	0,10
0,29	3,16	0,21	4,18	139,19	0,17	0,12	130,79	0,02	0,02
0,42	1,56	0,11	0,93	214,83	0,10	0,02	216,22	0,03	0,01
0,50	9,11	0,04	9,40	33,37	0,02	1,92	72,94	0,09	0,01
1,42	28,85	0,04	0,31	179,76	1,18	0,00	80,87	0,09	0,71

**Annexe 70 : Concentrations en éléments traces ($\mu\text{g/l}$) dans les nappes d'altérites (puits)
et de socle (forage) en février 2003.**

Type	Station	Date	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	Ni
PUITS	Al Hamoud	11/02/03 08:40	10,78	2,26	41,39	0,21	16,10	0,27	1,23
	Ananinga	08/02/03 09:35	3,87	2,03	18,95	0,19	12,11	0,17	1,21
	Babayaka mosq.	09/02/03 18:22	5,72	4,27	104,89	0,06	52,26	2,51	3,11
	Babayaka vil.	09/02/03 18:05	14,95	18,83	59,61	2,50	58,95	1,65	6,55
	Belefongo	11/02/03 14:10	2,29	95,40	3,93	0,18	37,38	0,52	1,63
	Bortoko	12/02/03 16:04	13,79	1,69	2,39	0,29	13,73	0,14	0,59
	CPR-Sosso	12/02/03 09:47	22,70	3,80	10,13	0,14	1,28	0,06	0,58
	Dendougou	06/02/03 10:41	6,08	2,13	19,33	0,04	153,23	0,09	1,18
	Djakpengou	11/02/03 10:10	3,18	1,53	3,35	1,02	6,32	0,25	1,45
	Djougou-SRH	05/02/03 15:00	0,88	6,00	3,20	0,09	1,43	0,09	1,82
	Founga	09/02/03 16:15	6,91	1,93	125,09	0,08	77,73	5,38	8,97
	Foyo	07/02/03 14:25	5,43	1,31	13,29	1,95	1,85	0,06	1,31
	Gangamou	12/02/03 14:35	4,92	2,22	2,11	4,71	9,37	0,70	8,46
	Gaounga	08/02/03 12:37	3,72	2,83	0,25	0,10	83,83	0,36	0,62
	Gniouri	13/02/03 10:57	2,58	3,85	354,54	0,66	91,74	1,39	2,89
	Koko-sika	08/02/03 15:10	15,27	2,09	1,01	0,24	88,00	0,54	0,54
	Kolokondé	12/02/03 10:47	8,24	5,70	3,81	0,18	512,23	6,24	4,34
	Koua	06/02/03 15:49	3,47	2,30	136,56	4,96	12,64	0,28	5,64
	Kparisi	11/02/03 11:34	4,24	3,88	9,94	0,78	9,68	0,10	0,63
	Kpegounou	11/02/03 16:35	3,15	2,30	6,85	2,23	6,90	0,15	4,66
	Kountia	13/02/03 15:35	3,57	2,29	139,74	4,96	13,14	0,29	6,04
	Mone mosquée	07/02/03 10:53	1,18	2,71	4,80	1,27	242,47	2,99	1,58
	Mone village	07/02/03 10:10	0,46	14,76	224,07	0,35	25,74	0,36	1,77
	Pamido	05/02/03 16:53	0,31	1,89	13,73	3,00	1,73	0,05	0,92
	Sankoro	12/02/03 12:51	10,86	6,76	5,06	1,37	10,68	0,23	2,92
	Sériveri	06/02/03 14:07	3,29	1,98	11,08	0,28	94,31	1,62	2,30
	Tchakpaissa	06/02/03 12:30	1,57	1,96	6,19	0,82	37,24	0,08	0,41
Téwamou	12/02/03 15:30	1,73	1,22	4,52	26,30	29,53	0,97	22,80	
FORAGE	Al Hamoud	11/02/03 08:40	38,87	3,58	3,26	0,11	31,44	0,23	0,39
	Ananinga1	07/02/03 11:54	6,20	2,31	7,23	0,15	191,29	0,99	1,32
	Ananinga2	07/02/03 12:30	7,69	2,10	15,65	0,35	75,17	0,16	0,74
	Belefongo	11/02/03 16:00	8,51	5,32	0,74	2,23	159,27	0,17	4,40
	Djapengou	11/02/03 10:47	23,25	4,22	3,30	0,13	80,58	0,11	0,44
	Foyo1	08/02/03 10:20	9,18	1,29	1,62	1,58	1,14	0,05	0,50
	Foyo2	08/02/03 10:50	14,64	5,01	56,06	0,48	76,34	0,05	0,86
	Foyo3	08/02/03 11:30	14,27	2,89	3,00	0,16	191,53	0,14	0,55
	Gaounga	08/02/03 14:13	7,11	0,63	27,78	0,47	6,90	0,08	0,84
	Gniouri	13/02/03 11:37	7,25	4,45	3,23	1,82	16,98	0,09	1,29
	Kolokondé	12/02/03 12:00	10,34	2,37	4,07	0,73	87,00	0,65	1,90
	Kparisi	11/02/03 12:15	9,90	1,36	4,31	0,36	292,32	0,86	0,51
	Kpegounou	11/02/03 17:10	9,17	2,10	5,02	0,37	208,72	1,29	1,13
	Mone	07/02/03 09:50	4,21	0,84	3,39	3,38	0,47	0,02	1,91

1,15	14,57	0,06	36,55	648,56	0,15	3,02	514,46	0,03	0,08
0,75	11,90	0,17	2,96	161,41	0,08	0,02	128,77	0,03	0,02
1,69	17,82	0,13	13,61	903,60	0,30	0,04	720,65	0,15	0,72
0,22	348,52	0,05	7,02	68,45	0,05	0,03	73,66	0,01	0,00
1,57	13,74	0,25	15,23	65,65	0,06	0,44	88,01	0,54	0,05
0,61	3,09	0,18	1,51	234,30	0,25	0,01	105,94	0,01	0,08
0,37	7,55	0,19	2,93	224,04	0,07	0,01	154,19	0,01	0,00
0,61	19,29	0,04	15,21	216,26	0,06	0,02	308,74	0,02	0,00
0,73	12,32	0,02	5,64	45,24	0,02	0,16	125,13	0,08	0,01
0,40	4,28	0,07	22,44	21,92	0,05	0,80	14,25	0,06	0,03
0,93	3,77	0,86	14,75	184,89	0,71	0,07	46,85	0,08	0,76
0,34	2,80	0,05	0,66	50,51	0,06	0,02	45,42	0,03	0,00
1,11	8,60	0,09	0,25	175,39	1,21	0,02	75,93	0,06	0,62
0,21	6,30	0,36	1,52	98,14	2,47	0,10	49,67	0,08	0,36
0,37	4,03	0,07	1,16	283,38	2,25	0,05	205,14	0,03	0,21
0,43	5,34	0,11	1,69	174,70	0,18	0,02	64,74	0,02	0,06
0,41	3,66	0,21	0,68	117,56	1,60	0,01	91,77	0,06	0,21
0,57	2,02	0,40	0,70	149,75	0,29	0,01	189,30	0,02	0,05
0,30	1,78	0,11	1,46	429,56	0,12	0,01	254,28	0,26	0,01
0,64	5,28	0,11	0,50	85,94	0,46	0,00	62,08	0,12	0,17

Annexe 72 : Concentrations en éléments traces ($\mu\text{g/l}$) dans les nappes d'altérites (puits) et de socle (forage) en août 2003.

Type	Station	Date	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	Ni
	Al Hamoud	09/08/03 10:08	1,63	20,95	1388,68	2,32	6,28	0,34	2,95
	Ananiga	08/08/03 15:10	0,98	3,63	61,12	0,90	0,71	0,07	0,85
	Babayaka	10/08/03 16:45	0,99	19,13	22,23	0,56	0,78	0,10	0,69
	Baréi	10/08/03 10:15	3,20	15,00	12,48	1,60	0,63	0,09	1,29
	Bariénou	08/08/03 11:27	3,16	3,55	13,91	0,92	6,47	0,05	1,06
	Béléfoungo	09/08/03 13:45	0,35	112,01	12,01	1,16	0,75	0,20	0,77
	Dendougou	08/08/03 10:00	1,47	4,19	161,73	0,70	2,59	0,12	1,45
PUITS	Djapengou	09/08/03 10:33	1,99	18,63	13,33	0,81	0,43	0,14	0,49
	Founga	11/08/03 09:50	1,65	20,77	65,13	0,48	7,26	0,20	1,16
	Gangamou	10/08/03 14:15	4,66	2,35	10,49	4,27	10,36	0,49	8,30
	Gniouri	08/08/03 17:15	0,91	32,59	22,71	0,62	2,79	0,28	1,61
	Kolokondé	09/08/03 15:25	3,00	13,70	14,35	2,50	19,60	0,19	1,01
	Koua	08/08/03 11:27	3,56	2,82	8,17	3,15	10,63	0,15	4,02
	Kountia	08/08/03 12:14	2,09	6,02	1642,70	2,00	20,51	1,43	6,35
	Kparsi	09/08/03 12:00	2,73	6,19	18,57	0,99	1,52	0,09	0,67
	Kpégounou	09/08/03 14:54	5,01	4,74	24,70	3,21	9,11	0,40	8,85
	Pabégou	10/08/03 17:20	1,14	2,29	14,28	0,38	8,64	0,16	0,43
	Sérétiouri	10/08/03 15:35	10,43	5,66	12,00	0,31	44,14	0,63	1,87
	Soubroukou	08/08/03 18:25	0,64	2,71	496,16	0,60	2,98	0,14	1,39
	Ananiga	08/08/03 15:25	8,41	1,95	11,98	0,41	63,08	0,14	0,71
	Djapengou	09/08/03 11:15	26,59	4,07	8,27	0,32	67,57	0,11	0,89

FORAGE	Foyo	08/08/03 14:26	13,82	4,49	10,20	0,58	37,20	0,04	0,57
	Kparsi	09/08/03 12:14	10,57	1,56	7,31	0,52	339,32	0,94	0,70
	Kpégounou	09/08/03 14:30	8,41	1,81	11,80	0,14	498,46	2,24	1,48
	Moné	08/08/03 15:50	8,77	1,80	14,66	7,02	2,04	0,04	3,81
	Nodiangui	08/08/03 13:15	7,81	3,32	9,67	0,10	233,60	0,67	3,38

Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Cs	Ba	Pb	U
2,20	12,22	0,21	27,42	265,50	0,10	0,14	206,75	0,29	0,05
0,73	5,94	0,11	2,43	130,07	0,29	0,02	92,36	0,05	0,02
0,70	2,65	0,19	56,98	216,80	0,16	0,37	90,38	0,35	0,35
0,69	5,86	0,22	40,51	422,40	0,12	2,00	133,12	0,09	0,69
0,54	15,24	0,18	0,80	126,45	0,40	0,01	78,37	0,04	0,23
1,08	13,74	0,37	108,67	1336,40	1,27	0,13	232,08	0,10	5,84
1,13	6,69	0,09	6,18	50,38	0,02	0,14	44,18	0,13	0,02
1,27	12,96	0,24	20,50	435,56	0,18	0,05	250,10	0,05	0,20
4,14	5,19	0,20	26,32	191,13	0,24	1,03	236,38	0,10	0,18
1,32	16,71	0,23	39,11	602,64	0,11	3,40	559,36	0,16	0,12
3,82	22,34	0,33	36,40	388,33	0,38	0,09	233,84	0,31	0,42
1,39	12,13	0,74	36,73	1072,00	0,23	0,12	798,76	0,14	0,81
0,27	332,46	0,07	8,20	82,89	0,06	0,07	73,93	0,45	0,01
1,57	12,74	0,15	15,73	61,65	0,05	0,24	68,01	0,24	0,04
0,66	6,65	0,39	2,16	268,66	0,33	0,02	103,94	0,05	0,15
1,27	18,80	0,31	9,37	299,86	0,12	0,08	294,74	0,04	0,02
0,39	5,03	0,12	27,75	34,55	0,07	0,94	15,56	0,06	0,04
0,73	4,67	0,81	16,76	218,26	0,45	0,09	73,38	0,02	1,66
0,64	5,37	0,04	0,82	24,01	0,01	0,04	29,03	0,07	0,02
0,95	9,88	0,03	0,24	175,37	1,15	0,00	73,94	0,04	0,66
0,24	5,21	0,33	1,53	103,89	2,53	0,10	48,79	0,17	0,42
0,26	4,66	0,04	1,12	265,64	1,80	0,03	185,77	0,02	0,22
0,69	29,14	0,19	0,79	119,01	1,57	0,01	90,97	0,09	0,19
0,78	5,17	0,31	0,89	153,46	0,31	0,01	191,09	0,14	0,05
0,54	18,71	0,05	1,59	335,28	0,11	0,00	255,88	0,08	0,03
0,38	32,12	0,04	0,44	86,33	0,49	0,01	63,13	0,40	0,18

0,95	1,33	0,06	1,86	191,43	0,51	74,05	0,01	0,09
1,21	1,83	0,81	0,75	123,57	1,93	103,65	0,02	0,23
0,98	1,49	0,45	0,93	178,49	0,39	219,61	0,01	0,16
0,49	3,54	0,08	0,83	145,67	0,09	143,11	0,01	0,01
0,29	1,31	0,06	0,99	87,70	0,87	26,61	0,03	0,64

Annexe 75 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la station piézométrique expérimentale « Amont » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Prof-nappe (m)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
2	25/08/04 10:05	2,830	89	28,5	6,2
2	30/08/04 00:00	2,020	28	26,9	5,9
2	11/10/04 16:35	2,630	59	27,2	
10	27/07/04 09:25	5,750	250	28,1	6,97
10	25/08/04 10:05	5,050	170	29,4	6,31
10	16/09/04 09:30	3,450	156	28,4	6,73
20	27/07/04 09:25	5,680	227	28,4	6,82
20	25/08/04 10:05	5,050	193	29,5	6,50
20	16/09/04 09:30	3,540	188	27,9	6,53
20	11/10/04 16:35	3,630	183	28,0	

Annexe 76 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la station piézométrique expérimentale « Milieu » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Prof-nappe (m)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
2	02/08/04 13:50	2,680	99	28,5	6,3
2	25/08/04 10:43	2,880	78	28,4	6,1
2	16/09/04 10:16	2,800	57	27,4	6,2
10	28/07/04 16:30	4,320	148	28,2	6,5
10	02/08/04 13:50	4,090	147	29,3	6,5
10	25/08/04 10:43	3,300	145	28,8	6,3
10	16/09/04 10:16	2,940	153	28,5	6,3
10	11/10/04 18:05	3,550	150	27,8	
20	28/07/04 16:30	5,140	217	27,9	6,6
20	02/08/04 13:50	4,880	214	29,5	6,8
20	25/08/04 10:43	3,900	198	28,8	6,5
20	16/09/04 10:16	3,490	208	28,2	6,4
20	11/10/04 18:05	3,630	197	28,0	

Annexe 77 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la station piézométrique expérimentale « Aval » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Prof-nappe (m)	C.E. (µS/cm)	T (°C)	pH
2	12/08/04 14:50	1,42	99,00	28,80	6,0
2	25/08/04 14:57	1,39	60,00	29,30	5,7
2	16/09/04 12:25	1,14	48,60	27,50	
10	28/07/04 17:55	5,75	183,00	27,90	6,5
10	12/08/04 14:50	5,52	186,00	29,20	6,2
10	25/08/04 14:57	5,36	181,00	29,30	6,3
10	16/09/04 12:25	5,09	191,40	28,00	6,4
10	11/10/04 18:45	4,99	196,30	27,90	
20	28/07/04 17:55	5,75	241,00	27,50	6,6
20	12/08/04 14:50	5,52	257,00	28,80	6,5
20	25/08/04 14:57	5,36	286,00	30,20	6,7
20	16/09/04 12:25	5,11	320,00	28,60	
20	11/10/04 18:45	4,96	294,00	28,60	

Annexe 78 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) des eaux de la station piézométrique expérimentale « Amont » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Si
2	25/08/04 10:05	0,45	0,19	0,15	0,08	0,70	0,07	0,04	0,02	24,16
2	30/08/04 00:00	0,12	0,06	0,08	0,04	0,30	0,02	0,00	0,01	18,12
2	16/09/04 09:30	0,12	0,06	0,10	0,04	0,27	0,04	0,01	0,00	22,69
2	11/10/04 16:35	0,19	0,10	0,15	0,07	0,42	0,05	0,01	0,01	27,06
10	27/07/04 09:25	0,75	0,53	1,04	0,10	2,10	0,28	0,00	0,00	155,36
10	25/08/04 10:05	0,46	0,41	0,78	0,05	1,36	0,25	0,00	0,01	155,97
10	16/09/04 09:30	0,42	0,38	0,71	0,05	1,25	0,22	0,00	0,01	151,74
10	11/10/04 00:00	0,42	0,38	0,72	0,05	1,27	0,22	0,00	0,01	150,24
10	07/01/05 00:00	0,40	0,36	0,72	0,06	1,39	0,22	0,00	0,01	151,06
20	27/07/04 09:25	0,67	0,56	0,91	0,14	1,94	0,23	0,00	0,00	146,35
20	25/08/04 10:05	0,57	0,48	0,81	0,11	1,66	0,19	0,00	0,02	139,16
20	16/09/04 09:30	0,55	0,44	0,81	0,11	1,58	0,19	0,00	0,02	140,84
20	11/10/04 16:35	0,51	0,43	0,87	0,11	1,73	0,15	0,00	0,05	143,00
20	07/01/05 00:00	0,55	0,45	0,76	0,12	1,76	0,20	0,01	0,01	140,08

Annexe 79 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) des eaux de la station piézométrique expérimentale « Milieu » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Si
2	02/08/04 13:50	0,48	0,14	0,27	0,05	0,55	0,06	0,22	0,07	32,26
2	13/08/04 00:00	0,36	0,10	0,26	0,04	0,58	0,03	0,03	0,03	32,91
2	25/08/04 10:43	0,32	0,07	0,30	0,05	0,58	0,05	0,08	0,05	31,61
2	30/08/04 00:00	0,15	0,04	0,21	0,03	0,35	0,03	0,05	0,01	37,05

2	16/09/04 10:16	0,14	0,05	0,27	0,03	0,36	0,03	0,05	0,03	36,68
10	28/07/04 16:30	0,41	0,33	0,68	0,13	1,36	0,11	0,00	0,01	149,04
10	02/08/04 13:50	0,40	0,33	0,68	0,13	1,35	0,11	0,00	0,01	147,82
10	25/08/04 10:43	0,41	0,35	0,66	0,11	1,50	0,08	0,00	0,01	146,06
10	16/09/04 10:16	0,42	0,37	0,67	0,12	1,39	0,09	0,00	0,01	145,12
10	11/10/04 18:05	0,40	0,34	0,65	0,11	1,46	0,08	0,00	0,00	145,26
10	06/01/05 00:00	0,38	0,33	0,65	0,11	1,42	0,08	0,00	0,00	143,66
20	28/07/04 16:30	0,72	0,60	0,70	0,17	1,79	0,19	0,00	0,01	151,96
20	02/08/04 13:50	0,77	0,61	0,71	0,17	1,94	0,19	0,00	0,01	152,11
20	12/08/04 13:50	0,78	0,61	0,71	0,16	1,77	0,16	0,00	0,01	152,26
20	25/08/04 10:43	0,68	0,56	0,68	0,15	1,94	0,15	0,00	0,01	152,87
20	16/09/04 10:16	0,67	0,59	0,70	0,17	1,77	0,18	0,00	0,02	153,73
20	11/10/04 18:05	0,67	0,54	0,68	0,17	1,95	0,13	0,00	0,01	152,96
20	06/01/05 00:00	0,67	0,54	0,69	0,17	1,97	0,16	0,00	0,01	153,92

Annexe 80 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) des eaux de la station piézométrique expérimentale « Aval » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Si
2	12/08/04 14:50	0,58	0,07	0,42	0,03	0,94	0,03	0,00	0,01	96,45
2	25/08/04 14:57	0,16	0,06	0,45	0,02	0,67	0,01	0,00	0,01	98,28
2	30/08/04 00:00	0,12	0,04	0,45	0,02	0,68	0,01	0,00	0,00	100,16
2	16/09/04 12:25	0,10	0,04	0,45	0,02	0,55	0,02	0,00	0,00	108,38
2	05/01/05 00:00	0,05	0,04	0,50	0,03	0,59	0,03	0,00	0,01	
10	28/07/04 17:55	0,36	0,35	1,01	0,13	1,58	0,05	0,00	0,05	148,12
10	12/08/04 14:50	0,34	0,42	1,02	0,12	1,70	0,05	0,00	0,05	145,76
10	25/08/04 14:57	0,35	0,42	0,99	0,12	1,91	0,03	0,00	0,04	145,48
10	16/09/04 12:25	0,40	0,44	1,05	0,13	1,79	0,06	0,00	0,05	145,28
10	11/10/04 18:45	0,39	0,47	1,05	0,12	2,05	0,04	0,00	0,05	148,20
10	05/01/05 00:00	0,35	0,46	1,02	0,13	1,92	0,04	0,00	0,04	148,72
20	28/07/04 17:55	0,80	0,70	0,95	0,00	2,34	0,07	0,00	0,05	136,51
20	12/08/04 14:50	0,89	0,79	0,93	0,16	2,48	0,06	0,00	0,04	134,56
20	25/08/04 14:57	1,08	0,90	0,94	0,19	3,13	0,08	0,00	0,03	136,92
20	16/09/04 12:25	1,27	0,99	0,95	0,00	3,04	0,09	0,00	0,04	126,29
20	11/10/04 18:45	1,11	0,93	0,85	0,01	3,09	0,07	0,00	0,03	137,76
20	05/01/05 00:00	0,64	0,61	0,95	0,16	2,29	0,05	0,00	0,04	138,12

Annexe 81 : Concentrations en éléments traces (en µg/l) des eaux de la station piézométrique expérimentale « Amont » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Si	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Co	Ni
2	25/08/04 10:05	24,16	1,97	4,27	125,51	1,49	0,28	79,74	1,61	1,24
2	30/08/04 00:00	18,12	1,48	3,20	94,13	1,12	0,21	59,81	1,21	0,93
2	16/09/04 09:30	22,69	1,58	3,41	100,41	1,19	0,22	63,79	1,29	0,99
2	11/10/04 16:35	27,06	1,46	3,16	92,88	1,10	0,21	59,01	1,19	0,92
10	27/07/04 09:25	155,36	69,39	11,76	25,27	2,13		539,83	0,72	4,48
10	25/08/04 10:05	155,97	70,43	12,76	34,26	3,63		639,51	1,51	7,51
10	16/09/04 09:30	151,74	59,98	10,99	23,12	2,66		581,44	1,33	7,27
10	11/10/04 00:00	150,24	67,30	15,18	29,62	3,07		624,85	1,50	7,22
10	07/01/05 00:00	151,06	48,47	9,16	48,61	4,31		1045,10	6,42	17,64
20	27/07/04 09:25	146,35	37,19	5,12	19,82	1,50		432,73	4,25	9,90
20	25/08/04 10:05	139,16	34,24	4,59	17,87	1,23		413,15	4,30	11,03
20	16/09/04 09:30	140,84	32,12	5,00	23,42	2,13		408,33	4,03	8,62
20	11/10/04 16:35	143,00	27,31	4,25	22,42	1,97		412,22	4,67	10,87
20	07/01/05 00:00	140,08	34,53	5,04	20,76	2,78		454,55	5,64	9,18

Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
0,52	12,04	0,14	1,78	140,61	0,07	131,92	3,35	0,04
0,39	9,03	0,11	1,33	105,46	0,06	98,94	2,51	0,03
0,41	9,63	0,11	1,42	112,49	0,06	105,54	2,68	0,03
0,38	8,91	0,10	1,31	104,05	0,06	97,62	2,48	0,03
1,22	8,72		2,11	193,87	11,46	224,08	0,90	0,08
1,11	11,00		2,46	194,82	11,78	243,95	1,61	0,07
1,23	11,59		2,11	185,72	11,62	234,60	1,21	0,17
2,17	16,13		2,56	190,02	11,74	238,64	1,63	0,09
0,67	14,85		0,92	198,04	6,79	263,82	0,33	0,35
0,66	13,21		1,55	162,10	9,15	69,97	0,33	0,14
0,66	14,80		1,56	161,83	9,10	71,16	0,32	0,09
2,24	22,56		1,80	160,79	9,01	70,96	3,31	0,07
0,71	7,20		1,78	166,79	10,68	84,69	0,47	0,20
0,70	19,21		2,46	158,95	7,00	88,34	0,16	0,17

Annexe 82 : Concentrations en éléments traces (en µg/l) des eaux de la station piézométrique expérimentale « Milieu » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Co	Ni
2	02/08/04 13:50	1,17	7,00	36,79	2,33	0,20	16,11	0,15	0,54
2	13/08/04 00:00	1,15	6,86	36,06	2,28	0,19	15,79	0,15	0,53
2	25/08/04 10:43	1,29	7,71	40,47	2,56	0,22	17,72	0,17	0,60
2	30/08/04 00:00	1,52	9,11	47,83	3,03	0,25	20,94	0,20	0,71
2	16/09/04 10:16	1,18	7,07	37,16	2,35	0,20	16,27	0,15	0,55

10	28/07/04 16:30	69,64	2,29	11,59	1,74	269,06	5,87	10,47
10	02/08/04 13:50	133,50	3,18	30,16	1,97	321,98	6,17	11,31
10	25/08/04 10:43	66,44	2,29	19,03	1,42	209,36	2,59	7,31
10	16/09/04 10:16	70,48	2,19	28,03	2,77	290,12	8,31	7,01
10	11/10/04 18:05	68,76	1,96	26,98	1,78	288,81	8,46	5,91
10	06/01/05 00:00	68,01	2,04	26,13	1,71	256,63	6,18	7,82
20	28/07/04 16:30	83,80	3,37	23,42	1,48	376,34	1,65	4,82
20	02/08/04 13:50	80,13	3,39	27,56	1,49	392,24	1,75	4,37
20	12/08/04 13:50	81,70	3,50	20,09	1,37	277,61	1,06	4,41
20	25/08/04 10:43	70,94	3,22	22,99	1,43	333,63	1,26	2,82
20	16/09/04 10:16	82,02	3,52	24,38	1,56	376,26	1,65	3,33
20	11/10/04 18:05	80,30	3,11	27,01	1,66	365,28	2,29	2,25
20	06/01/05 00:00	81,11	3,14	27,28	1,68	368,93	2,31	2,27

Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
0,48	11,88	0,11	2,14	41,80	0,12	44,84	0,59	0,01
0,47	11,64	0,11	2,09	40,97	0,12	43,95	0,58	0,01
0,52	13,06	0,12	2,35	45,98	0,14	49,33	0,65	0,01
0,62	15,44	0,14	2,78	54,35	0,16	58,29	0,77	0,02
0,48	11,99	0,11	2,16	42,22	0,13	45,29	0,60	0,01
1,14	9,73		4,31	106,44	1,09	81,78	0,27	0,01
1,40	11,93		2,50	49,09	3,31	37,35	4,50	0,04
1,09	12,01		3,14	104,04	0,89	100,13	0,17	0,01
1,11	18,27		2,53	98,80	0,87	78,97	1,53	0,01
0,62	9,31		2,26	94,75	0,77	75,32	4,41	0,01
1,03	10,51		3,43	100,77	0,93	86,87	0,21	0,00
0,29	1,92		3,96	151,45	1,74	95,88	0,18	0,03
0,40	4,07		4,16	159,22	1,87	104,05	0,28	0,03
0,63	5,97		4,55	149,37	1,67	98,32	0,45	0,02
1,32	5,03		3,87	144,05	1,62	105,99	0,10	0,03
0,83	12,66		3,44	136,11	1,61	89,78	1,35	0,09
0,33	4,51		2,78	130,89	1,56	94,93	0,40	0,07
0,33	4,56		2,80	132,20	1,58	95,88	0,41	0,07

Annexe 83 : Concentrations en éléments traces (en µg/l) des eaux de la station piézométrique expérimentale « Aval » mesurés dans les piézomètres de 2, 10 et 20 m de profondeur.

Prof-piézo (m)	Date	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Co	Ni
2	12/08/04 14:50	0,81	5,00	63,09	2,36	0,24	170,11	2,09	0,78
2	25/08/04 14:57	0,80	4,90	61,83	2,32	0,24	166,71	2,05	0,76
2	30/08/04 00:00	0,82	5,05	63,72	2,39	0,24	171,81	2,11	0,78
2	16/09/04 12:25	0,82	5,02	63,41	2,38	0,24	170,96	2,10	0,78
2	11/10/04 00:00	0,82	5,02	63,45	2,38	0,24	171,08	2,10	0,78
2	05/01/05 00:00	0,89	5,50	69,40	2,60	0,26	187,12	2,30	0,85

10	28/07/04 17:55	133,09	3,10	24,14	2,57	327,76	5,82	11,83
10	12/08/04 14:50	130,03	3,83	16,32	11,10	90,75	0,12	7,07
10	25/08/04 14:57	120,39	3,22	19,39	6,68	204,24	3,36	7,97
10	16/09/04 12:25	110,74	2,61	22,46	2,27	317,74	6,60	8,87
10	11/10/04 18:45	125,21	3,16	20,93	4,63	260,99	4,59	8,42
10	05/01/05 00:00	123,89	3,18	20,65	5,45	240,30	4,10	8,83
20	28/07/04 17:55	141,25	3,70	26,90	12,85	14,91	0,10	2,33
20	12/08/04 14:50	132,09	3,48	19,56	12,50	29,82	0,17	4,43
20	25/08/04 14:57	145,12	3,91	35,34	12,54	51,66	0,25	5,74
20	16/09/04 12:25	134,73	3,10	23,57	2,34	327,81	6,06	10,16
20	11/10/04 18:45	147,93	3,70	36,89	9,44	188,13	0,35	4,75
20	05/01/05 00:00	138,03	3,50	27,62	8,60	155,95	0,17	4,81

Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb	U
0,46	9,52	0,16	1,97	27,99	0,22	24,77	0,35	0,02
0,45	9,33	0,16	1,93	27,43	0,21	24,27	0,35	0,01
0,47	9,61	0,16	1,99	28,26	0,22	25,02	0,36	0,02
0,47	9,57	0,16	1,98	28,12	0,22	24,89	0,35	0,02
0,47	9,57	0,16	1,98	28,14	0,22	24,91	0,36	0,02
0,51	10,47	0,18	2,17	30,78	0,24	27,24	0,39	0,02
1,73	9,59		3,81	57,74	3,14	48,08	2,37	0,03
1,68	14,01		3,75	66,91	4,39	29,42	1,66	1,36
1,17	9,88		2,72	55,09	3,85	34,78	1,65	0,70
0,66	5,74		1,69	43,28	3,32	40,13	1,64	0,04
1,42	9,73		3,23	56,42	3,59	37,45	1,65	0,37
1,33	9,79		3,04	55,89	3,66	37,97	1,79	0,50
2,27	5,63		4,76	71,83	4,02	30,84	0,36	1,04
1,89	9,52		3,96	68,57	4,16	29,68	0,33	1,13
1,74	10,10		4,13	71,55	4,21	35,91	0,30	0,76
1,40	11,10		2,29	49,75	3,15	40,59	0,54	0,07
0,84	9,14		3,20	71,13	4,46	21,40	3,01	1,71
0,72	7,07		2,94	66,25	4,23	24,35	0,85	1,51

Annexe 84 : Paramètres physico-chimiques à la station limnimétrique d'Ara-Pont

Date	Débit (m ³ /s)	C.E. (µS/cm)	pH	T (°C)	O ₂ (mg/l)
18/07/02 00:00	0,021	28			
17/02/03 08:35	0,000	181			
23/07/03 09:40	0,265	40			
27/07/03 13:25	0,093	43			
29/07/03 20:26	0,087	38			
31/07/03 05:00	0,187	39	6,9	25,2	5,25

31/07/03 05:30	0,373	38	6,9	25,1	5,63
31/07/03 06:00	9,427	9	6,6	23,1	6,58
31/07/03 06:30	25,250	9	6,8	22,8	6,61
31/07/03 07:00	33,960	9	6,7	22,9	6,68
31/07/03 08:00	37,230	8	6,6	22,8	6,60
31/07/03 09:00	16,550	12	6,9	22,8	6,74
31/07/03 10:30	8,526	16	6,6	23,0	6,28
31/07/03 11:30	5,083	20	6,6	23,2	6,57
31/07/03 12:30	4,701	23	7,0	23,4	6,28
31/07/03 13:30	3,629	25	6,8	23,6	6,03
31/07/03 15:00	2,225	27	6,8	24,3	5,83
31/07/03 16:00	1,934	30	6,9	24,6	6,41
30/08/03 13:15	0,641	33			
01/09/03 13:15	2,241	33			
02/09/03 18:15	1,754	32			
03/09/03 14:30	1,583	33			
04/09/03 11:00	1,682	26			
04/09/03 12:00	2,587	26			
04/09/03 13:30	2,871	25	7,2	25,3	3,61
04/09/03 14:00	3,464	19	6,5	24,9	3,66
04/09/03 14:30	5,302	17	6,7	24,8	3,74
04/09/03 15:30	2,871	21	6,4	24,6	3,57
04/09/03 16:00	2,800	24	7,6	24,5	3,45
04/09/03 16:30	2,729	26	7,4	24,7	3,445
04/09/03 17:00	2,557	28	6,7	25,1	3,44
04/09/03 18:15	0,590	30	6,7	25,0	3,60
04/09/03 18:30	0,743	31	6,9	24,9	3,42
04/09/03 21:05	0,625	33	6,5	24,9	3,90
04/09/03 23:00	0,602	33	6,5	24,5	3,84
05/09/03 05:00	0,560	32	6,6	23,5	3,78
13/09/03 18:23	0,242	34			
16/09/03 10:40	0,399	32			
18/09/03 14:50	0,252	33			
02/10/03 00:00	0,156	43			
16/11/03 00:00	0,000	40			

20/07/04 10:28	0,080	30
23/07/04 12:54	0,120	38
08/08/04 17:00	0,180	39
21/08/04 09:07	0,140	40
15/09/04 08:57	0,160	37
07/10/04 12:52	0,120	36
29/10/04 10:57	0,000	37

Annexe 85 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) à la station limnimétrique d'Ara-Pont

Date	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Si
18/07/02 00:00	0,23	0,19	0,06	0,18	0,53	0,05	0,01	0,01	
17/02/03 08:35	0,38	0,29	0,45	0,34	0,83	0,41	0,07	0,20	
31/07/03 05:00	0,14	0,11	0,06	0,09	0,39	0,02	0,00	0,00	17,57
31/07/03 05:30	0,13	0,11	0,07	0,09	0,35	0,01	0,00	0,00	19,81
31/07/03 06:00	0,05	0,04	0,04	0,01	0,15	0,01	0,01	0,00	3,86
31/07/03 06:30	0,04	0,03	0,05	0,01	0,12	0,01	0,00	0,00	3,54
31/07/03 07:00	0,04	0,04	0,05	0,01	0,11	0,00	0,00	0,00	4,65
31/07/03 08:00	0,03	0,03	0,04	0,01	0,10	0,01	0,00	0,00	4,05
31/07/03 09:00	0,04	0,04	0,05	0,01	0,14	0,00	0,00	0,00	6,98
31/07/03 10:30	0,06	0,05	0,05	0,01	0,16	0,00	0,00	0,00	7,51
31/07/03 11:30	0,08	0,07	0,06	0,02	0,21	0,01	0,00	0,00	9,78
31/07/03 12:30	0,09	0,08	0,07	0,02	0,23	0,01	0,00	0,00	12,04
31/07/03 13:30	0,10	0,09	0,07	0,03	0,25	0,01	0,00	0,00	13,31
31/07/03 15:00	0,10	0,09	0,07	0,04	0,26	0,01	0,00	0,00	13,28
31/07/03 16:00	0,11	0,10	0,07	0,04	0,30	0,01	0,00	0,00	15,07
04/09/03 13:30	0,08	0,06	0,05	0,04	0,23	0,02	0,01	0,00	5,22
04/09/03 14:00	0,07	0,05	0,05	0,03	0,20	0,01	0,01	0,00	4,16
04/09/03 14:30	0,05	0,05	0,04	0,02	0,17	0,01	0,01	0,00	3,09
04/09/03 15:30	0,07	0,06	0,05	0,02	0,20	0,01	0,01	0,00	3,98
04/09/03 16:00	0,08	0,07	0,05	0,03	0,23	0,05	0,01	0,00	5,25
04/09/03 16:30	0,09	0,07	0,05	0,04	0,26	0,03	0,00	0,00	6,76
04/09/03 17:00	0,10	0,08	0,05	0,05	0,29	0,01	0,00	0,00	6,43
04/09/03 18:15	0,10	0,08	0,04	0,05	0,30	0,01	0,00	0,00	7,49
04/09/03 18:30	0,10	0,08	0,04	0,05	0,31	0,01	0,00	0,00	8,05
04/09/03 21:05	0,11	0,09	0,04	0,06	0,33	0,02	0,00	0,00	8,90

04/09/03 23:00	0,11	0,09	0,04	0,06	0,33	0,02	0,00	0,00	9,25
05/09/03 05:00	0,11	0,09	0,03	0,07	0,32	0,01	0,00	0,00	9,60
18/09/03 14:50	0,11	0,08	0,02	0,12	0,34	0,01	0,00	0,00	10,83
02/10/03 00:00	0,12	0,09	0,02	0,13	0,39	0,01	0,00	0,00	9,25
16/11/03 00:00	0,16	0,10	0,04	0,18	0,46	0,04	0,00	0,00	9,88
20/07/04 10:28	0,19	0,12	0,04	0,14	0,43	0,01	0,00	0,00	
23/07/04 12:54	0,12	0,03	0,01	0,03	0,19	0,01	0,00	0,00	
08/08/04 17:00	0,17	0,10	0,02	0,14	0,40	0,01	0,00	0,00	
21/08/04 09:07	0,10	0,01	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	
15/09/04 08:57	0,16	0,09	0,02	0,14	0,37	0,01	0,00	0,00	
07/10/04 12:52	0,12	0,08	0,01	0,14	0,34	0,02	0,00	0,00	
29/10/04 10:57	0,15	0,09	0,02	0,16	0,38	0,02	0,00	0,00	

Annexe 86 : Concentrations en éléments trace (en µg/l) à la station limnimétrique d'Ara-Pont

Date	Al	Sr	Ba	B	Rb	Mn	Zn	Cu
18/07/2 00 :00	28,21	43,15	31,15	5,59	3,08	128,74	3,00	1,34
31/07/03 05:00	102,48	21,18	18,71	1,91	1,30	0,33	0,71	0,62
31/07/03 05:30	89,75	20,16	18,01	1,85	1,29	0,36	0,49	0,53
31/07/03 06:00	32,04	7,52	8,20	1,72	1,00	1,29	0,62	0,30
31/07/03 06:30	23,66	7,11	7,46	2,05	1,15	0,94	0,84	0,37
31/07/03 07:00	31,28	8,39	9,24	2,19	1,12	0,88	1,58	0,36
31/07/03 08:00	22,53	5,40	6,47	2,08	1,08	0,79	2,95	0,48
31/07/03 09:00	21,86	7,18	8,02	2,55	1,14	0,33	0,79	0,44
31/07/03 10:30	47,97	8,87	9,34	3,04	1,26	0,33	0,32	0,50
31/07/03 11:30	51,72	11,39	11,51	3,42	1,41	0,56	0,75	0,60
31/07/03 12:30	103,96	14,20	13,97	3,88	1,56	0,48	0,73	0,67
31/07/03 13:30	106,04	15,32	14,58	4,03	1,61	0,44	0,83	0,68
31/07/03 15:00	95,51	16,31	14,92	3,97	1,59	0,57	1,54	0,97
31/07/03 16:00	131,63	18,08	16,17	3,96	1,65	0,80	0,63	0,73
04/09/03 13:30	15,38	16,31	13,12	3,06	1,71	29,21	6,55	0,60
04/09/03 14:00	39,33	13,69	10,41	3,08	1,71	24,03	3,62	0,54
04/09/03 14:30	63,28	11,08	7,69	3,10	1,71	18,85	0,69	0,47
04/09/03 15:30	64,66	11,96	9,06	3,36	1,70	16,32	0,87	0,49
04/09/03 16:00	66,05	12,85	10,43	3,62	1,69	13,79	1,04	0,52
04/09/03 16:30	27,78	14,70	11,81	3,70	1,59	12,09	0,67	0,49

04/09/03 17:00	26,11	17,12	13,92	3,46	1,44	10,21	0,97	0,50
04/09/03 18:15	40,24	18,25	14,80	3,04	1,34	9,59	1,10	0,50
04/09/03 18:30	33,80	18,84	15,29	3,00	1,34	10,34	1,22	0,50
04/09/03 21:05	34,78	19,48	15,63	2,65	1,17	9,84	0,63	0,42
04/09/03 23:00	30,15	19,56	15,83	2,26	0,99	10,09	1,39	0,35
05/09/03 05:00	32,46	19,52	15,73	2,45	1,08	9,96	1,01	0,38
02/10/03 00:00	17,85	20,07	17,38	2,25	1,12	9,79	0,52	0,35
16/11/03 00:00	13,15	22,41	19,38	2,52	1,39	24,61	0,91	0,47
20/07/04 10:28	111,06	23,09	18,76	3,90	1,63	7,63	1,11	0,86
23/07/04 12:54	112,98	21,12	18,45	3,61	1,89	9,75	0,50	1,05
08/08/04 17:00	130,37	22,78	20,32	3,18	1,38	20,92	0,44	0,52

Date	Ni	Cr	Li	Pb	As	Co	Mo	U	Cs
18/07/02 00 :00	0,49	0,24	0,54	0,05	0,19	0,80	0,07	0,04	0,01
31/07/03 05:00	0,38	0,30	0,31	0,06	0,09	0,04	0,03	0,02	0,02
31/07/03 05:30	0,35	0,30	0,29	0,05	0,09	0,04	0,04	0,02	0,02
31/07/03 06:00	0,21	0,22	0,13	0,09	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01
31/07/03 06:30	0,24	0,22	0,11	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
31/07/03 07:00	0,27	0,21	0,14	0,13	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
31/07/03 08:00	0,26	0,22	0,15	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
31/07/03 09:00	0,29	0,37	0,15	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
31/07/03 10:30	0,36	0,28	0,16	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01
31/07/03 11:30	0,40	0,32	0,18	0,15	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01
31/07/03 12:30	0,44	0,37	0,21	0,09	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01
31/07/03 13:30	0,46	0,35	0,23	0,06	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01
31/07/03 15:00	0,63	0,64	0,25	0,06	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01
31/07/03 16:00	0,49	0,56	0,29	0,06	0,10	0,06	0,03	0,03	0,02
04/09/03 13:30	0,55	0,28	0,73	0,02	0,09	0,40	0,05	0,02	0,01
04/09/03 14:00	0,47	0,25	0,52	0,03	0,09	0,30	0,04	0,01	0,01
04/09/03 14:30	0,39	0,23	0,31	0,04	0,08	0,20	0,04	0,01	0,01
04/09/03 15:30	0,44	0,25	0,34	0,07	0,08	0,19	0,03	0,01	0,01
04/09/03 16:00	0,48	0,27	0,38	0,09	0,08	0,19	0,03	0,01	0,01
04/09/03 16:30	0,51	0,25	0,46	0,05	0,09	0,17	0,03	0,02	0,01
04/09/03 17:00	0,49	0,26	0,59	0,04	0,11	0,15	0,03	0,01	0,01
04/09/03 18:15	0,72	0,22	0,71	0,04	0,12	0,16	0,05	0,01	0,01

04/09/03 18:30	0,54	0,25	0,70	0,05	0,11	0,16	0,03	0,01	0,01
04/09/03 21:05	0,47	0,24	0,81	0,04	0,11	0,16	0,03	0,01	0,01
04/09/03 23:00	0,59	0,21	0,96	0,13	0,09	0,17	0,03	0,01	0,01
05/09/03 05:00	0,53	0,23	0,89	0,08	0,10	0,17	0,03	0,01	0,01
02/10/03 00:00	1,41	0,14	1,01	0,03	0,09	0,13	0,03	0,01	0,01
16/11/03 00:00	0,59	0,16	0,81	0,01	0,09	0,21	0,06	0,01	0,00
20/07/04 10:28	0,48	0,43	0,64	0,04	0,13	0,13	0,09	0,03	2,94
23/07/04 12:54	0,52	0,35	0,85	0,05	0,20	0,19	0,06	0,04	2,10
08/08/04 17:00	0,45	0,28	1,07	0,03	0,13	0,22	0,05	0,02	1,91

Annexe 87 : Paramètres physico-chimiques à la station limnimétrique de Donga-Kolo

Date	Débit (m ³ /s)	C.E. (μS/cm)	T (°C)	pH	O ₂ (mg/l)
28/07/03 13:37	0,794	58			
28/08/03 12:35	1,467	48			
31/08/03 10:25	74,600	46			
01/09/03 12:35	7,090	46			
03/09/03 12:00	3,308	45			
04/09/03 14:40	32,040	28	24	7,0	6,49
04/09/03 15:10	34,300	31	24,7	6,7	6,03
04/09/03 16:10	36,060	29	24,8	6,8	5,35
04/09/03 16:40	36,570	25	24,9	6,8	5,75
04/09/03 17:10	36,630	22	25	6,8	5,66
04/09/03 17:40	35,810	22	25	6,8	5,42
04/09/03 18:10	33,470	23	25	6,9	5,55
04/09/03 18:40	31,030	23	25	6,8	5,5
04/09/03 19:10	27,550	23	24,9	6,7	5,62
04/09/03 19:40	23,420	25	24,9	6,8	5,53
04/09/03 20:10	19,100	29	24,3	6,9	5,2
04/09/03 20:40	15,100	33	24,5	6,9	5,8
04/09/03 21:10	12,220	35	24,8	6,9	5,41
04/09/03 21:40	10,300	37	24,6	6,7	5,41
04/09/03 22:10	8,860	38	24,6	6,9	5,42
04/09/03 22:40	8,087	40	24,6	6,9	5,04
04/09/03 23:10	7,473	43	24,6	6,9	5,33
04/09/03 23:40	6,937	43	24,8	7,0	5,24

05/09/03 12:10	4,279	50	26,2	7,0	5,47
06/09/03 11:17	3,973	52			
18/09/03 09:45	1,967	49	25,7	6,9	5,33
09/10/03 12:35	0,520	61			
16/11/03 08:50	0,259	67			
23/07/04 13:55	0,087	48			
10/08/04 09:20	0,001	51			
21/08/04 09:37	0,347	49			
16/09/04 10:21	0,800	62			
07/10/04 10:50	0,347	52			
29/10/04 11:40	0,001	62			

Annexe 88 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) à la station limnimétrique de Donga-Kolo

Date	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Si
04/09/03 14:40	0,07	0,06	0,05	0,04	0,22	0,03	0,01	0,00	4,26
04/09/03 15:10	0,10	0,08	0,05	0,04	0,26	0,03	0,01	0,01	3,34
04/09/03 16:10	0,09	0,08	0,05	0,04	0,25	0,03	0,01	0,01	3,50
04/09/03 16:40	0,08	0,07	0,05	0,04	0,23	0,03	0,01	0,01	3,21
04/09/03 17:10	0,07	0,06	0,05	0,03	0,21	0,02	0,01	0,01	2,93
04/09/03 17:40	0,07	0,06	0,05	0,03	0,22	0,02	0,01	0,01	2,87
04/09/03 18:10	0,07	0,07	0,05	0,03	0,22	0,02	0,01	0,01	2,72
04/09/03 18:40	0,07	0,07	0,05	0,03	0,23	0,02	0,01	0,00	2,77
04/09/03 19:10	0,08	0,07	0,05	0,04	0,25	0,02	0,01	0,00	2,72
04/09/03 19:40	0,08	0,07	0,05	0,04	0,25	0,02	0,01	0,00	2,19
04/09/03 20:10	0,09	0,08	0,05	0,04	0,25	0,02	0,01	0,01	1,67
04/09/03 20:40	0,10	0,09	0,05	0,05	0,29	0,02	0,01	0,00	3,83
04/09/03 21:10	0,12	0,10	0,05	0,05	0,32	0,02	0,01	0,00	5,99
04/09/03 21:40	0,12	0,11	0,05	0,05	0,33	0,02	0,01	0,00	6,47
04/09/03 22:10	0,13	0,12	0,05	0,06	0,35	0,02	0,01	0,00	6,96
04/09/03 22:40	0,13	0,12	0,05	0,06	0,37	0,03	0,01	0,00	7,44
04/09/03 23:10	0,13	0,12	0,05	0,06	0,37	0,02	0,01	0,00	7,52
04/09/03 23:40	0,13	0,12	0,05	0,06	0,38	0,02	0,01	0,00	7,61
05/09/03 12:10	0,17	0,15	0,03	0,09	0,47	0,02	0,01	0,01	9,80
18/09/03 09:45	0,16	0,14	0,02	0,15	0,47	0,02	0,00	0,00	
09/10/03 12:35	0,20	0,16	0,04	0,10	0,57	0,02	0,01	0,00	

16/11/03 08:50	0,30	0,23	0,08	0,13	0,73	0,04	0,01	0,00
23/07/04 13:55	0,23	0,15	0,07	0,20	0,48	0,09	0,01	0,03
10/08/04 09:20	0,23	0,16	0,03	0,17	0,59	0,03	0,00	0,00
21/08/04 09:37	0,22	0,15	0,02	0,17	0,49	0,02	0,00	0,00
16/09/04 10:21	0,24	0,17	0,02	0,18	0,53	0,02	0,01	0,00
07/10/04 10:50	0,22	0,16	0,02	0,18	0,54	0,02	0,00	0,00
29/10/04 11:40	0,25	0,17	0,02	0,19	0,56	0,02	0,01	0,00

Annexe 89 : Concentrations en éléments traces (en µg/l) à la station limnimétrique de Donga-Kolo

Date	Al	Sr	Ba	Mn	B	Zn	Rb	Cu
28/07/03 13:37	25,143	17,352	14,170	0,752	4,830	1,249	1,043	1,476
04/09/03 14:40	104,100	11,915	9,203	15,546	2,726	0,739	1,271	0,666
04/09/03 15:10	109,270	15,733	12,088	14,380	3,091	1,431	1,198	0,827
04/09/03 16:10	145,000	15,099	11,681	11,013	3,099	1,146	1,264	0,714
04/09/03 16:40	129,995	13,609	10,806	11,648	3,238	5,995	1,290	0,828
04/09/03 17:10	114,990	12,119	9,932	12,283	3,377	10,844	1,317	0,943
04/09/03 17:40	103,049	12,532	10,116	10,941	3,342	8,667	1,316	1,058
04/09/03 18:10	91,108	12,944	10,301	9,599	3,308	6,491	1,316	1,172
04/09/03 18:40	85,710	13,579	10,715	8,840	3,319	5,043	1,299	1,040
04/09/03 19:10	80,312	14,214	11,129	8,080	3,331	3,596	1,282	0,909
04/09/03 19:40	74,913	14,849	11,542	7,321	3,342	2,148	1,265	0,777
04/09/03 20:10	69,515	15,484	11,956	6,562	3,354	0,701	1,249	0,645
04/09/03 20:40	68,503	16,903	13,019	6,780	3,329	0,670	1,238	0,646
04/09/03 21:10	67,491	18,322	14,082	6,998	3,304	0,640	1,227	0,646
04/09/03 21:40	66,479	19,740	15,145	7,216	3,279	0,609	1,216	0,647
04/09/03 22:10	65,467	21,159	16,208	7,434	3,254	0,579	1,205	0,648
04/09/03 22:40	64,455	22,578	17,271	7,652	3,229	0,548	1,194	0,649
04/09/03 23:10	64,268	22,847	17,424	7,716	3,199	0,551	1,186	0,642
04/09/03 23:40	64,080	23,116	17,578	7,780	3,169	0,555	1,178	0,635
05/09/03 12:10	59,395	29,842	21,411	9,377	2,421	0,632	0,972	0,460
16/11/03 08:50	47,178	30,226	21,632	8,447	2,257	1,509	0,935	0,444
23/07/04 13:55	128,220	31,709	24,939	4,671	1,613	14,687	2,882	1,364

Date	Ni	Cr	Li	Co	Pb	As	Mo	U	Cs
28/07/03 13:37	0,426	0,196	0,161	0,044	0,042	0,059	0,086	0,012	0,002
04/09/03 14:40	0,417	0,265	0,157	0,187	0,066	0,055	0,045	0,011	0,007
04/09/03 15:10	0,540	0,282	0,147	0,180	0,123	0,054	0,073	0,010	0,007
04/09/03 16:10	0,567	0,350	0,167	0,163	0,068	0,061	0,065	0,012	0,008
04/09/03 16:40	0,670	0,330	0,172	0,181	0,077	0,062	0,061	0,013	0,008
04/09/03 17:10	0,774	0,310	0,178	0,198	0,086	0,062	0,057	0,014	0,008
04/09/03 17:40	0,743	0,316	0,186	0,182	0,108	0,064	0,053	0,015	0,008
04/09/03 18:10	0,711	0,322	0,193	0,165	0,131	0,065	0,048	0,016	0,008
04/09/03 18:40	0,659	0,324	0,209	0,152	0,109	0,066	0,048	0,016	0,008
04/09/03 19:10	0,607	0,325	0,224	0,138	0,086	0,067	0,047	0,016	0,008
04/09/03 19:40	0,555	0,326	0,239	0,124	0,064	0,067	0,047	0,016	0,008
04/09/03 20:10	0,502	0,327	0,255	0,110	0,041	0,068	0,046	0,016	0,008
04/09/03 20:40	0,516	0,350	0,271	0,113	0,043	0,069	0,050	0,016	0,008
04/09/03 21:10	0,530	0,372	0,287	0,115	0,045	0,070	0,054	0,015	0,009
04/09/03 21:40	0,543	0,394	0,304	0,117	0,047	0,071	0,058	0,015	0,010
04/09/03 22:10	0,557	0,416	0,320	0,119	0,048	0,072	0,062	0,014	0,010
04/09/03 22:40	0,570	0,439	0,336	0,122	0,050	0,072	0,066	0,014	0,011
04/09/03 23:10	0,566	0,432	0,340	0,121	0,049	0,072	0,065	0,014	0,011
04/09/03 23:40	0,561	0,425	0,343	0,121	0,049	0,072	0,065	0,014	0,011
05/09/03 12:10	0,447	0,250	0,433	0,118	0,032	0,068	0,050	0,008	0,006
16/11/03 08:50	0,529	0,178	0,509	0,100	0,066	0,080	0,056	0,006	0,005
23/07/04 13:55	0,774	0,613	0,345	4,653	0,132	0,303	0,090	0,024	3,020

Annexe 90 : Paramètres physico-chimiques à la station limnimétrique de Donga-Pont

Date	Débit (m ³ /s)	C.E. (µS/cm)	pH	T (°C)	O ₂ (mg/l)
18/07/02 00 : 00	2,422	70			
07/02/03 14:50	0,000				
23/07/03 11:20	9,740	52			
25/07/03 11:25	12,158	34			
29/07/03 17:10	5,638	50			
30/07/03 19:10	8,3620	58			
31/07/03 17:10	50,023	29	6,9	24,6	5,79
31/07/03 18:10	51,407	30	7,0	25,0	5,90
31/07/03 19:10	52,193	32	7,0	24,6	3,06

31/07/03 20:00	52,685	34	7,0	24,5	5,85
31/07/03 22:00	53,570	34	7,0	24,2	5,80
31/07/03 23:00	53,970	35	7,0	24,2	7,20
01/08/03 01:00	55,350	34	7,0	24,0	6,29
01/08/03 03:00	56,830	24	7,0	23,6	5,83
01/08/03 05:00	59,670	21	7,0	23,2	5,92
01/08/03 07:00	63,770	20	6,8	23,3	5,90
01/08/03 09:00	71,760	20	6,9	23,7	6,31
01/08/03 11:00	83,440	22	6,9	25,4	6,46
01/08/03 13:30	105,600	24	6,9	25,4	6,27
01/08/03 15:30	123,000	26	6,9	24,9	6,13
01/08/03 17:15	131,250	26	6,9	24,7	6,80
01/08/03 19:15	134,050	30	6,9	24,5	6,92
01/08/03 22:00	129,700	35	6,9	24,6	5,84
01/08/03 23:00	126,500	36	7,0	24,6	5,63
02/08/03 00:00	123,000	37	7,0	24,5	6,52
02/08/03 03:00	107,600	43	7,0	24,8	5,04
02/08/03 07:00	81,950	46	6,9	25,0	5,30
02/08/03 10:00	55,650	56	6,9	25,6	5,19
02/08/03 12:00	38,180	56	7,0	25,8	5,73
02/08/03 14:00	28,030	56			
11/08/03 11:47	35,292	41			
12/08/03 03:30	47,220	36	7,0	24,6	3,91
12/08/03 04:00	48,600	37	6,8	25,0	4,09
12/08/03 05:00	51,500	36	6,9	25,1	3,88
12/08/03 06:00	53,870	35	6,8	25,0	3,98
12/08/03 07:00	56,240	37	6,8	25,1	3,97
12/08/03 08:00	58,410	37	6,8	25,1	3,79
12/08/03 09:00	59,990	35	6,9	25,3	3,96
12/08/03 10:15	61,407	34	6,8	25,6	3,91
12/08/03 11:30	62,510	33	6,7	27,2	4,29
12/08/03 12:30	62,930	32	6,8	29,8	4,19
12/08/03 13:00	63,140	33	6,8	25,4	4,09
12/08/03 15:00	63,980	30	6,8	25,1	4,22
12/08/03 17:00	65,390	28	7,0	25,1	4,62

12/08/03 19:00	67,740	34	6,9	27,9	4,78
12/08/03 22:30	83,820	39	6,9	27,1	4,08
13/08/03 00:30	87,550	35	7,0	26,0	4,10
13/08/03 10:30	104,560	35	6,9	25,2	3,98
13/08/03 11:30	103,950	33	6,8	25,5	4,08
13/08/03 12:30	103,233	31	6,9	26,1	3,81
13/08/03 14:30	102,860	29	6,9	26,6	4,10
13/08/03 16:30	103,180	27	6,8	25,4	4,10
14/08/03 11:00	124,700	39	6,9	25,4	4,09
14/08/03 12:00	123,000	40	6,8	25,3	3,65
14/08/03 13:00	120,800	42	6,9	25,4	3,71
14/08/03 14:00	118,200	44	6,9	26,0	3,41
14/08/03 15:00	114,800	46	6,8	25,8	3,04
14/08/03 17:00	107,600	50	6,9	25,6	2,60
14/08/03 18:00	103,500	50	6,9	25,6	2,77
14/08/03 19:00	99,500	51	6,9	25,4	2,86
14/08/03 23:00	80,180	58	6,8	24,5	2,49
15/08/03 00:00	74,870	59	6,6	24,1	2,42
15/08/03 02:00	63,140	56	6,7	24,1	2,87
15/08/03 04:00	50,910	52	6,7	24,1	3,32
15/08/03 06:00	43,080	51	6,7	24,6	3,32
15/08/03 08:00	39,460	50	6,6	25,0	3,32
15/08/03 10:00	37,920	41	6,5	26,2	3,14
31/08/03 14:55	96,331	40			
03/09/03 18:00	27,110	60			
04/09/03 18:00	28,030	36			
04/09/03 20:00	34,720	43			
05/09/03 00:00	42,400	50	6,7	24,6	3,50
05/09/03 03:00	42,190	52	6,8	24,8	3,54
05/09/03 04:00	42,360	47	6,8	24,5	3,38
05/09/03 06:00	43,080	39	6,7	23,6	3,92
05/09/03 08:00	45,010	36	6,7	24,5	3,56
05/09/03 10:00	47,220	35	6,7	24,7	3,58
05/09/03 12:00	49,730	36	6,8	25,0	3,78
05/09/03 14:00	52,390	40	6,8	25,1	3,44

05/09/03 16:00	54,460	44	6,8	25,2	3,69
05/09/03 18:00	53,867	48	6,8	24,9	3,81
05/09/03 20:00	51,500	54	6,8	24,9	3,43
05/09/03 22:00	45,570	58	6,7	25,2	3,57
06/09/03 01:00	34,950	57	6,7	25,6	3,23
06/09/03 04:00	30,945	58	6,8	26,4	3,31
06/09/03 07:00	34,480	48	6,8	25,3	3,34
06/09/03 10:00	37,410	49	6,8	26,0	3,54
06/09/03 13:00	38,180	50	6,9	25,5	3,78
13/09/03 10:48	22,868	58			
15/09/03 18:30	30,793	31			
16/09/03 17:45	17,700	59			
08/10/03 16:50	7,204	67			
16/11/03 08:50	0,349	106			
23/07/04 16:45	3,509	68			
21/08/04 12:52	8,576	70			
20/09/04 15:30	6,485	102			
09/10/04 14:15	3,907	73			
27/10/04 16:29	0,209	102			

Annexe 91 : Concentrations en ions majeurs (en meq/l sauf Si en mg/l) à la station limnimétrique de Donga-Pont

Date	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Si
18/07/2002	0,13	0,10	0,08	0,06	0,31	0,00	0,00	0,01	4,2
07/02/03 14:50	0,74	0,67	0,10	0,54	2,28	0,06	0,00	0,01	
31/07/03 17:10	0,10	0,09	0,06	0,07	0,36	0,02	0,01	0,00	3,23
31/07/03 18:10	0,11	0,10	0,05	0,07	0,36	0,02	0,01	0,00	8,94
31/07/03 19:10	0,12	0,11	0,05	0,07	0,35	0,01	0,00	0,00	11,19
31/07/03 20:00	0,12	0,11	0,05	0,07	0,34	0,02	0,00	0,00	10,42
31/07/03 22:00	0,14	0,12	0,05	0,08	0,34	0,02	0,00	0,00	10,53
31/07/03 23:00	0,13	0,12	0,05	0,08	0,34	0,02	0,00	0,00	10,73
01/08/03 01:00	0,13	0,12	0,05	0,08	0,34	0,02	0,00	0,00	10,08
01/08/03 03:00	0,13	0,11	0,05	0,07	0,33	0,02	0,01	0,00	8,26
01/08/03 05:00	0,09	0,08	0,04	0,05	0,25	0,01	0,00	0,00	6,83
01/08/03 07:00	0,08	0,07	0,04	0,04	0,26	0,01	0,00	0,00	5,94
01/08/03 09:00	0,07	0,06	0,04	0,03	0,21	0,01	0,00	0,00	7,28

01/08/03 11:00	0,08	0,07	0,05	0,04	0,22	0,00	0,00	0,00	8,61
01/08/03 13:30	0,08	0,08	0,05	0,04	0,28	0,01	0,00	0,00	9,49
01/08/03 15:30	0,09	0,08	0,05	0,04	0,27	0,01	0,00	0,00	9,13
01/08/03 17:15	0,09	0,07	0,04	0,05	0,26	0,01	0,00	0,00	8,77
01/08/03 19:15	0,09	0,09	0,05	0,05	0,27	0,01	0,00	0,00	9,39
01/08/03 22:00	0,11	0,09	0,05	0,06	0,28	0,01	0,01	0,00	11,22
01/08/03 23:00	0,13	0,11	0,05	0,07	0,34	0,01	0,00	0,00	11,95
02/08/03 00:00	0,13	0,12	0,05	0,08	0,34	0,01	0,00	0,00	11,13
02/08/03 03:00	0,13	0,12	0,05	0,08	0,36	0,01	0,00	0,00	12,47
02/08/03 07:00	0,16	0,14	0,06	0,10	0,45	0,01	0,01	0,00	13,81
02/08/03 10:00	0,17	0,15	0,05	0,11	0,45	0,01	0,01	0,00	17,78
02/08/03 12:00	0,20	0,18	0,06	0,15	0,52	0,02	0,01	0,00	15,80
12/08/03 07:00	0,13	0,12	0,07	0,05	0,410	0,02	0,01	0,00	2,53
12/08/03 08:00	0,13	0,12	0,07	0,05	0,408	0,02	0,00	0,00	2,91
12/08/03 09:00	0,13	0,11	0,06	0,05	0,401	0,01	0,00	0,00	6,20
12/08/03 10:15	0,12	0,11	0,06	0,05	0,386	0,01	0,00	0,00	5,80
12/08/03 11:30	0,11	0,10	0,07	0,05	0,379	0,02	0,00	0,00	6,19
12/08/03 12:30	0,11	0,10	0,07	0,04	0,362	0,02	0,00	0,00	7,85
12/08/03 13:00	0,10	0,10	0,07	0,04	0,308	0,03	0,00	0,00	5,27
12/08/03 15:00	0,10	0,14	0,07	0,11	0,32	0,04	0,02	0,00	2,10
12/08/03 17:00	0,10	0,08	0,07	0,04	0,331	0,02	0,00	0,00	5,31
12/08/03 19:00	0,10	0,08	0,09	0,05	0,361	0,03	0,00	0,00	3,07
12/08/03 22:30	0,14	0,12	0,07	0,05	0,367	0,02	0,00	0,00	3,21
13/08/03 00:30	0,11	0,08	0,09	0,05	0,347	0,04	0,00	0,00	3,90
13/08/03 10:30	0,13	0,11	0,07	0,04	0,341	0,01	0,00	0,00	5,22
13/08/03 11:30	0,12	0,10	0,09	0,04	0,404	0,03	0,00	0,00	4,93
13/08/03 12:30	0,11	0,10	0,06	0,04	0,353	0,02	0,00	0,00	4,47
13/08/03 14:30	0,10	0,09	0,07	0,04	0,343	0,02	0,00	0,00	4,39
13/08/03 16:30	0,09	0,08	0,06	0,04	0,298	0,02	0,00	0,00	5,48
14/08/03 11:00	0,15	0,13	0,07	0,05	0,389	0,02	0,00	0,00	6,57
14/08/03 12:00	0,15	0,13	0,07	0,05	0,380	0,03	0,00	0,00	6,08
14/08/03 13:00	0,15	0,13	0,08	0,05	0,397	0,02	0,00	0,00	6,84
14/08/03 14:00	0,17	0,15	0,08	0,06	0,426	0,03	0,00	0,00	7,08
14/08/03 15:00	0,18	0,15	0,08	0,06	0,448	0,02	0,00	0,00	7,63
14/08/03 17:00	0,19	0,16	0,08	0,06	0,471	0,03	0,00	0,00	7,65

14/08/03 18:00	0,19	0,16	0,07	0,07	0,557	0,02	0,00	0,00	7,45
14/08/03 19:00	0,19	0,16	0,04	0,11	0,57	0,02	0,01	0,00	9,05
14/08/03 23:00	0,23	0,19	0,08	0,08	0,588	0,03	0,00	0,00	9,36
15/08/03 00:00	0,30	0,20	0,07	0,08	0,619	0,02	0,00	0,00	11,80
15/08/03 02:00	0,24	0,20	0,07	0,08	0,630	0,02	0,00	0,00	10,78
15/08/03 04:00	0,24	0,20	0,07	0,08	0,640	0,03	0,00	0,00	12,32
15/08/03 06:00	0,23	0,20	0,07	0,09	0,587	0,02	0,00	0,00	11,20
15/08/03 08:00	0,22	0,19	0,06	0,09	0,577	0,02	0,00	0,00	10,35
15/08/03 10:00	0,21	0,18	0,06	0,08	0,577	0,02	0,00	0,00	10,21
05/09/03 00:00	0,13	0,11	0,04	0,01	0,329	0,02	0,00	0,00	0,51
05/09/03 03:00	0,19	0,16	0,05	0,07	0,508	0,02	0,01	0,00	7,66
05/09/03 04:00	0,16	0,14	0,05	0,07	0,464	0,02	0,01	0,00	6,81
05/09/03 06:00	0,13	0,12	0,05	0,06	0,365	0,02	0,01	0,00	5,75
05/09/03 08:00	0,12	0,11	0,05	0,05	0,302	0,03	0,01	0,00	5,14
05/09/03 10:00	0,12	0,11	0,05	0,05	0,302	0,03	0,01	0,00	5,36
05/09/03 12:00	0,12	0,11	0,06	0,05	0,320	0,02	0,01	0,00	5,58
05/09/03 14:00	0,14	0,12	0,06	0,06	0,411	0,02	0,01	0,00	5,84
05/09/03 16:00	0,14	0,12	0,06	0,06	0,447	0,01	0,00	0,00	5,91
05/09/03 18:00	0,18	0,15	0,06	0,07	0,493	0,02	0,01	0,01	7,53
05/09/03 20:00	0,20	0,17	0,06	0,08	0,516	0,01	0,01	0,00	8,23
05/09/03 22:00	0,22	0,18	0,06	0,09	0,557	0,01	0,01	0,00	8,53
06/09/03 01:00	0,22	0,18	0,06	0,08	0,498	0,01	0,01	0,00	9,40
06/09/03 04:00	0,21	0,18	0,05	0,09	0,528	0,02	0,01	0,00	8,80
06/09/03 07:00	0,18	0,15	0,05	0,07	0,474	0,01	0,01	0,00	7,20
06/09/03 10:00	0,18	0,16	0,05	0,07	0,465	0,01	0,01	0,00	7,44
06/09/03 13:00	0,17	0,15	0,05	0,07	0,457	0,02	0,00	0,00	7,12
16/09/03 17:45	0,18	0,17	0,03	0,14	0,52	0,02	0,00	0,00	9,32
08/10/03 16:50	0,26	0,23	0,03	0,18	0,71	0,03	0,01	0,00	10,05
16/11/03 08:50	0,42	0,35	0,05	0,24	1,00	0,03	0,01	0,00	10,11
23/07/04 16:45	0,13	0,08	0,03	0,07	0,24	0,02	0,01	0,00	
21/08/04 12:52	0,26	0,20	0,04	0,16	0,57	0,02	0,01	0,00	
20/09/04 15:30	0,31	0,23	0,03	0,19	0,67	0,03	0,00	0,00	
09/10/04 14:15	0,32	0,25	0,03	0,22	0,79	0,02	0,01	0,00	
27/10/04 16:29	0,49	0,36	0,04	0,24	1,00	0,03	0,01	0,00	

Annexe 92 : Concentrations en éléments traces (en µg/l) à la station limnimétrique de Donga-Pont

Date	Al	Sr	Ba	B	Rb	Mn	Zn	Cu
18/07/02 00:00	70,41	50,31	35,03	7,08	2,02	24,55	3,05	4,30
31/07/03 17:10	38,74	19,01	19,21	4,75	1,50	0,67	5,09	0,84
31/07/03 18:10	45,97	19,31	19,72	4,04	1,42	1,59	0,54	0,78
31/07/03 19:10	27,90	20,29	20,67	3,95	1,42	0,80	1,67	0,78
31/07/03 20:00	51,37	22,15	21,86	3,56	1,50	0,79	0,61	0,79
31/07/03 22:00	33,07	21,93	21,67	3,77	1,37	1,07	0,42	0,70
31/07/03 23:00	28,07	23,54	23,35	4,13	1,44	1,55	0,64	0,88
01/08/03 01:00	37,91	22,82	22,83	4,72	1,46	0,92	0,52	0,81
01/08/03 03:00	44,28	16,28	16,69	4,24	1,29	1,00	0,57	0,69
01/08/03 05:00	29,70	13,70	14,49	4,49	1,34	1,25	0,57	0,67
01/08/03 07:00	33,68	12,95	13,72	4,61	1,39	1,09	0,69	0,74
01/08/03 09:00	27,06	13,60	14,48	5,35	1,51	1,22	0,60	0,77
01/08/03 11:00	34,60	15,08	15,85	6,20	1,66	1,37	1,29	0,91
01/08/03 13:30	104,99	15,96	16,42	6,05	1,83	1,56	0,64	0,95
01/08/03 15:30	40,34	16,71	15,43	5,97	1,90	1,20	0,75	0,91
01/08/03 17:15	92,71	18,29	17,80	6,01	1,92	1,45	0,61	1,00
01/08/03 19:15	113,07	18,69	17,88	5,13	1,86	1,98	0,95	1,09
01/08/03 22:00	178,03	21,74	21,34	5,30	1,99	1,80	0,67	1,09
01/08/03 23:00	54,50	22,95	22,19	5,67	2,03	2,18	1,03	1,11
02/08/03 00:00	63,56	23,67	22,77	6,18	2,03	2,34	1,12	1,18
02/08/03 03:00	48,95	28,38	25,83	5,75	1,99	1,52	0,50	1,04
02/08/03 07:00	59,28	31,90	29,72	6,18	2,06	1,75	0,61	1,08
02/08/03 10:00	56,40	38,25	33,38	5,73	2,06	1,42	0,51	1,11
02/08/03 12:00	39,82	38,61	33,46	5,93	2,08	2,04	1,21	1,19
12/08/03 07:00	55,83	21,56	20,90	5,12	1,70	1,42	0,95	0,92
12/08/03 08:00	188,04	22,22	18,72	5,27	1,66	1,80	1,93	0,88
12/08/03 09:00	218,07	22,68	19,04	5,14	1,69	1,88	2,17	0,90
12/08/03 10:15	248,10	23,14	19,37	5,01	1,71	1,97	2,41	0,93
12/08/03 11:30	295,21	22,84	19,04	4,94	1,73	1,98	1,81	0,95
12/08/03 12:30	342,32	22,53	18,72	4,87	1,74	1,99	1,21	0,97
12/08/03 13:00	361,81	22,18	18,56	4,73	1,74	2,06	1,44	0,99
12/08/03 15:00	381,31	21,83	18,41	4,60	1,74	2,13	1,66	1,02
12/08/03 17:00	354,04	22,36	18,70	4,36	1,72	2,07	1,58	1,01

12/08/03 19:00	326,76	22,90	18,98	4,13	1,70	2,01	1,49	1,01
12/08/03 22:30	393,79	23,22	19,23	4,31	1,73	2,22	1,51	1,06
13/08/03 00:30	460,82	23,54	19,47	4,50	1,77	2,42	1,53	1,11
13/08/03 10:30	367,79	22,75	18,50	4,28	1,70	2,19	1,20	1,07
13/08/03 11:30	274,76	21,97	17,54	4,05	1,63	1,96	0,88	1,03
05/09/03 03:00	33,14	29,26	21,54	2,78	1,41	0,65	6,51	0,68
05/09/03 04:00	36,97	33,85	24,50	2,68	1,35	0,80	1,02	0,69
05/09/03 06:00	29,36	29,90	20,89	2,61	1,26	0,63	0,72	0,69
05/09/03 08:00	40,67	23,40	16,95	2,59	1,29	0,57	0,84	0,84
05/09/03 10:00	38,21	22,63	16,44	2,77	1,30	0,74	0,74	0,77
05/09/03 12:00	35,75	21,87	15,94	2,95	1,30	0,90	0,64	0,71
05/09/03 14:00	41,07	24,85	18,59	3,04	1,40	1,38	1,12	0,77
05/09/03 16:00	38,49	28,27	20,89	2,97	1,43	1,29	0,85	0,77
05/09/03 18:00	35,90	31,69	23,18	2,91	1,45	1,20	0,57	0,78
05/09/03 20:00	32,92	36,21	26,38	2,89	1,52	1,31	0,57	0,78
05/09/03 22:00	29,94	40,72	29,58	2,88	1,60	1,42	0,57	0,79
06/09/03 01:00	28,91	39,68	28,72	2,75	1,51	1,12	0,46	0,71
06/09/03 04:00	27,89	38,64	27,87	2,62	1,43	0,82	0,36	0,63
06/09/03 07:00	28,99	31,49	22,00	2,76	1,30	0,70	0,69	0,65
06/09/03 10:00	36,01	31,90	22,38	2,90	1,33	0,92	0,82	0,68
06/09/03 13:00	43,04	32,30	22,75	3,04	1,37	1,13	0,94	0,71
08/10/03 16:50	22,67	47,93	32,92	2,53	1,44	11,70	0,26	0,52
16/11/03 08:50	16,39	79,87	47,53	3,52	2,71	28,89	2,02	0,58
23/07/04 16:45	187,89	44,28	34,02	4,97	2,01	7,07	1,06	1,24

Date	Ni	Cr	Pb	Li	As	Mo	Co	U	Cs
18/07/02 00 : 00	0,65	0,30	0,49	0,24	0,15	0,15	0,21	0,03	0,01
31/07/03 17:10	0,45	0,29	0,07		0,06	0,07	0,04	0,02	0,00
31/07/03 18:10	0,48	0,23	0,03		0,05	0,06	0,05	0,02	0,01
31/07/03 19:10	0,49	0,28	0,03		0,07	0,06	0,04	0,02	0,00
31/07/03 20:00	0,50	0,34	0,05		0,07	0,05	0,05	0,02	0,01
31/07/03 22:00	0,45	0,38	0,03		0,07	0,06	0,04	0,01	0,00
31/07/03 23:00	0,47	0,24	0,06		0,07	0,06	0,06	0,01	0,00
01/08/03 01:00	0,52	0,28	0,04		0,06	0,07	0,05	0,01	0,00
01/08/03 03:00	0,43	0,31	0,04		0,06	0,05	0,04	0,01	0,00

01/08/03 05:00	0,41	0,33	0,03		0,06	0,04	0,05	0,01	0,00
01/08/03 07:00	0,46	0,24	0,06		0,06	0,05	0,04	0,01	0,00
01/08/03 09:00	0,45	0,22	0,11		0,05	0,05	0,05	0,01	0,00
01/08/03 11:00	0,61	0,35	0,17		0,06	0,05	0,05	0,02	0,01
01/08/03 13:30	0,67	0,37	0,07		0,07	0,05	0,07	0,02	0,01
01/08/03 15:30	0,56	0,27	0,06		0,09	0,05	0,05	0,02	0,01
01/08/03 17:15	0,62	0,33	0,80		0,08	0,05	0,07	0,02	0,01
01/08/03 19:15	0,82	0,43	0,11		0,08	0,10	0,09	0,02	0,01
01/08/03 22:00	0,91	0,49	0,08		0,09	0,07	0,09	0,02	0,02
01/08/03 23:00	0,96	0,30	0,08		0,09	0,06	0,07	0,02	0,01
02/08/03 00:00	1,07	0,35	0,24		0,10	0,06	0,09	0,03	0,01
02/08/03 03:00	0,80	0,28	0,04		0,10	0,07	0,07	0,02	0,01
02/08/03 07:00	0,81	0,35	0,07		0,11	0,07	0,07	0,02	0,01
02/08/03 10:00	0,77	0,33	0,20		0,11	0,10	0,07	0,03	0,01
02/08/03 12:00	0,90	0,31	0,05		0,10	0,10	0,08	0,02	0,01
12/08/03 07:00	0,63	0,32	0,11		0,08	0,06	0,06	0,02	0,01
12/08/03 08:00	1,17	0,77	0,08		0,10	0,07	0,10	0,02	0,01
12/08/03 09:00	1,21	0,83	0,11		0,10	0,07	0,11	0,02	0,02
12/08/03 10:15	1,24	0,88	0,14		0,10	0,07	0,12	0,02	0,02
12/08/03 11:30	1,31	0,96	0,12		0,10	0,08	0,12	0,02	0,02
12/08/03 12:30	1,38	1,03	0,10		0,10	0,09	0,13	0,02	0,02
12/08/03 13:00	1,38	1,11	0,10		0,10	0,09	0,14	0,02	0,02
12/08/03 15:00	1,37	1,18	0,11		0,10	0,09	0,14	0,02	0,02
12/08/03 17:00	1,28	1,09	0,10		0,11	0,09	0,13	0,02	0,02
12/08/03 19:00	1,18	0,99	0,09		0,12	0,08	0,13	0,02	0,02
12/08/03 22:30	1,26	1,08	0,10		0,12	0,09	0,14	0,03	0,02
13/08/03 00:30	1,34	1,16	0,11		0,12	0,09	0,15	0,03	0,02
13/08/03 10:30	1,21	1,00	0,10		0,11	0,09	0,14	0,03	0,02
13/08/03 11:30	1,08	0,84	0,10		0,11	0,09	0,12	0,03	0,02
05/09/03 03:00	0,68	0,23	0,03	0,16	0,08	0,05	0,05	0,01	0,00
05/09/03 04:00	0,63	0,23	0,41	0,21	0,08	0,08	0,05	0,01	0,00
05/09/03 06:00	0,52	0,21	0,05	0,17	0,08	0,06	0,05	0,01	0,00
05/09/03 08:00	0,49	0,21	0,07	0,15	0,07	0,06	0,05	0,01	0,00
05/09/03 10:00	0,51	0,21	0,07	0,14	0,07	0,06	0,05	0,01	0,00
05/09/03 12:00	0,53	0,22	0,06	0,13	0,06	0,06	0,05	0,01	0,00

05/09/03 14:00	0,56	0,23	0,08	0,15	0,06	0,06	0,06	0,01	0,00
05/09/03 16:00	0,61	0,24	0,07	0,17	0,07	0,05	0,06	0,01	0,00
05/09/03 18:00	0,65	0,25	0,05	0,19	0,07	0,05	0,05	0,01	0,00
05/09/03 20:00	0,63	0,25	0,04	0,31	0,08	0,06	0,06	0,01	0,00
05/09/03 22:00	0,60	0,25	0,03	0,42	0,09	0,06	0,06	0,02	0,00
06/09/03 01:00	0,60	0,24	0,03	0,33	0,08	0,06	0,05	0,01	0,00
06/09/03 04:00	0,59	0,23	0,03	0,25	0,07	0,05	0,05	0,01	0,00
06/09/03 07:00	0,59	0,22	0,06	0,19	0,08	0,06	0,05	0,01	0,00
06/09/03 10:00	0,62	0,24	0,07	0,20	0,08	0,06	0,05	0,01	0,00
06/09/03 13:00	0,65	0,26	0,08	0,22	0,08	0,05	0,06	0,01	0,00
08/10/03 16:50	0,61	0,16	0,02	0,35	0,09	0,08	0,13	0,01	0,00
16/11/03 08:50	0,70	0,15	0,04	0,28	0,11	0,16	0,19	0,03	0,00
23/07/04 16:45	0,83	0,48	0,34	0,45	0,21	0,17	0,14	0,03	3,27

Annexe 93 : Compositions isotopiques des précipitations

Pluviomètre	Date	Hauteur (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Nalohou 2	16/02/03	20,5	+1,8	+23,6
Nalohou 2	30/07/03	110,9	-0,2	+5,1
Al Hamoud	30/07/03	136,7	-2,9	-15,0
Djougou	30/07/03	150,9	-2,3	-9,9
Foyo	30/07/03	88,5	-3,8	-18,3
Nalohou 2	31/07/03	22,5	-5,3	-28,6
Al Hamoud	05/09/03	32,0	-5,3	-34,0
Nalohou 2	05/09/03	11,7	-0,2	-16,9
Djougou	05/09/03	2,1	-0,3	-17,6
Foyo	04/09/03	23,0	-2,5	-19,4

Annexe 94 : Compositions isotopiques des nappes d'altérite et de socle

Type	Station	Date	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
	Ananina	28/07/02 11:40	-3,7	-17,0
	Ananina	06/07/03 13:28	-3,7	-18,1
	Djapengou	08/07/03 11:30	-3,6	-17,4
	Gniouri	09/07/03 13:05	-3,6	-17,0
	Kpégounou	08/07/03 17:02	-4,0	-17,5
PUITS	Moné	06/07/03 15:42	-3,9	-18,1
	Nodiangué	09/07/03 10:50	-3,3	-15,6
	Ananina	08/08/03 15:10	-3,8	-16,3
	Djapengou	09/08/03 10:33	-3,9	-17,2
	Gniouri	08/08/03 17:15	-3,3	-13,8

	Kparsi	09/08/03 12:00	-3,7	-19,1
	Kpégounou	09/08/03 14:54	-3,9	-17,3
	Ananina	28/07/02 12:22	-3,8	-17,9
	Ananina	06/07/03 14:55	-3,9	-17,6
	Djapengou	08/07/03 15:15	-3,8	-17,8
	Foyo	06/07/03 12:10	-3,9	-18,0
	Gniouri	09/07/03 13:20	-3,9	-16,4
	Kparsi	08/07/03 13:15	-3,9	-17,9
	Kpégounou	08/07/03 16:50	-3,9	-18,3
FORAGES	Moné	06/07/03 15:20	-4,1	-18,4
	Nodiangu	09/07/03 10:35	-3,6	-17,2
	Ananina	08/08/03 15:25	-4,0	-17,8
	Djapengou	09/08/03 11:15	-3,7	-18,0
	Foyo	08/08/03 14:26	-4,0	-19,8
	Kparsi	09/08/03 12:14	-4,1	-17,5
	Kpégounou	09/08/03 14:30	-4,1	-19,4
	Moné	08/08/03 15:50	-3,8	-18,5

Annexe 95 : Compositions isotopiques des écoulements à Ara-Pont

Date	Débit (m ³ /s)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)
18/07/02 00 :00	0,02086	-2,3	-6,8
31/07/03 05:00	0,18710	-3,2	-14,9
31/07/03 05:30	0,37280	-3,5	-14,3
31/07/03 06:00	9,42700	-3,8	-13,7
31/07/03 06:30	25,25000	-4,0	-16,5
31/07/03 07:00	33,96000	-4,1	-19,3
31/07/03 08:00	37,23000	-4,2	-18,8
31/07/03 09:00	16,55000	-4,3	-18,3
31/07/03 10:30	8,52600	-4,4	-20,5
31/07/03 11:30	5,08300	-4,6	-22,6
31/07/03 12:30	4,70100	-4,9	-25,4
31/07/03 13:30	3,62900	-5,1	-28,1
31/07/03 15:00	2,22500	-4,6	-25,0
31/07/03 16:00	1,93450	-4,1	-21,9
04/09/03 13:30	2,87100	-4,2	-25,3
04/09/03 14:00	3,46400	-4,5	-26,8
04/09/03 14:30	5,30200	-4,7	-28,3
04/09/03 15:30	2,87100	-5,2	-31,2
04/09/03 16:00	2,80000	-5,1	-30,7
04/09/03 16:30	2,72900	-5,1	-30,2
04/09/03 17:00	2,55675	-4,9	-29,2
04/09/03 18:15	0,58990	-4,5	-26,8
04/09/03 18:30	0,74330	-4,0	-24,3
04/09/03 21:05	0,62497	-4,0	-23,9
04/09/03 23:00	0,60179	-3,9	-23,4
05/09/03 05:00	0,56048	-3,8	-22,5
02/10/03 00:00	0,15629	-3,8	-18,5

Annexe 96 : Compositions isotopiques des écoulements à Donga-Kolo

Date	Débit (m ³ /s)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)
28/07/03 13:37	0,794	-1,9	-4,3
04/09/03 14:40	32,040	-5,1	-32,5
04/09/03 15:10	34,300	-5,3	-33,0
04/09/03 16:10	36,060	-5,4	-33,4
04/09/03 16:40	36,570	-5,4	-33,3
04/09/03 17:10	36,630	-5,3	-33,3
04/09/03 17:40	35,810	-5,3	-33,2
04/09/03 18:10	33,470	-5,2	-33,1
04/09/03 18:40	31,030	-5,2	-32,6
04/09/03 19:10	27,550	-5,1	-32,2
04/09/03 19:40	23,420	-5,1	-31,7
04/09/03 20:10	19,100	-5,0	-31,2
04/09/03 20:40	15,100	-4,9	-30,5
04/09/03 21:10	12,220	-4,8	-29,8
04/09/03 21:40	10,300	-4,6	-29,0
04/09/03 22:10	8,860	-4,5	-28,3
04/09/03 22:40	8,087	-4,4	-27,6
04/09/03 23:10	7,473	-4,3	-26,9
04/09/03 23:40	6,937	-4,2	-26,2
16/11/03 08:50		-2,7	-12,3

Annexe 97 : Compositions isotopiques des écoulements à Donga-Pont

Date	Débit (m ³ /s)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)
18/07/02 00:00	2,42150	-2,1	-4,3
31/07/03 17:10	50,02333	-3,4	-16,3
31/07/03 18:10	51,40667	-3,5	-16,1
31/07/03 19:10	52,19333	-3,6	-15,8
31/07/03 20:00	52,68500	-3,8	-17,1
31/07/03 22:00	53,57000	-4,0	-18,3
31/07/03 23:00	53,97000	-3,9	-19,5
01/08/03 01:00	55,35000	-3,8	-20,7
01/08/03 03:00	56,83000	-3,8	-19,5
01/08/03 05:00	59,67000	-3,8	-18,2
01/08/03 07:00	63,77000	-4,0	-18,3
01/08/03 09:00	71,76000	-4,2	-18,4
01/08/03 11:00	83,44000	-4,1	-18,7
01/08/03 13:30	105,60000	-4,0	-19,0
01/08/03 15:30	123,00000	-4,1	-18,8
01/08/03 17:15	131,25000	-4,2	-18,7
01/08/03 19:15	134,05000	-4,1	-18,4
01/08/03 22:00	129,70000	-4,0	-18,1
01/08/03 23:00	126,50000	-4,1	-18,0
02/08/03 00:00	123,00000	-4,1	-18,0
02/08/03 03:00	107,60000	-4,0	-17,0
02/08/03 07:00	81,95000	-3,8	-15,9
02/08/03 10:00	55,65000	-3,8	-15,5
02/08/03 12:00	38,18000	-3,7	-15,1

05/09/03 03:00	42,19000	-4,8	-27,8
05/09/03 04:00	42,36000	-4,4	-26,0
05/09/03 06:00	43,08000	-4,7	-28,3
05/09/03 08:00	45,01000	-4,9	-30,6
05/09/03 10:00	47,22000	-5,0	-30,0
05/09/03 12:00	49,73000	-5,0	-29,3
05/09/03 14:00	52,39000	-4,8	-27,7
05/09/03 16:00	54,46000	-4,6	-26,1
05/09/03 18:00	53,86667	-4,4	-25,3
05/09/03 20:00	51,50000	-4,2	-24,5
05/09/03 22:00	45,57000	-4,2	-24,8
06/09/03 01:00	34,95000	-4,2	-25,0
06/09/03 04:00	30,94500	-4,4	-27,4
06/09/03 07:00	34,48000	-4,6	-29,7
06/09/03 10:00	37,41000	-4,7	-29,6
06/09/03 13:00	38,18000	-4,7	-29,4
08/10/03 16:50	7,20378	-4,0	-20,5
16/11/03 08:50		-2,7	-12,3

Annexe 98 : Publication et communications orales

1- **Bamory Kamagaté^{1,*}**, Luc Séguis¹, Guillaume Favreau¹, Jean-Luc Seidel¹, Marc Descloitres² & Pascal Affaton³ (2006). Hydrological processes and water balance of a tropical crystalline bedrock catchment in Benin (Donga, upper Ouémé valley. *Compte Rendu Géosciences*.

A survey of a watershed of 586 km² in Benin (Africa) by hydrodynamic and geochemical measurements made possible to characterize the hydrological processes in play and its water balance for two consecutive years with changing rainfall. The groundwater table surveys show that recharge occurs by direct infiltration of rainfall and represents between 5 to 25% of the annual rainfall. The surface water outflow, limited in time to the rainy season, and the water chemistry both indicate a weak groundwater contribution to river discharge. This implies that the computed variations in annual runoff coefficients (of 14 and 30%) are mainly governed by surface and subsurface flows.

2- **Kamagaté B.**, Favreau G., Séguis L. & Seidel J.-L., 2005. Origins of the flows in a tropical crystalline bedrock catchment (Benin, upper Oueme river). Première conférence internationale AMMA, Dakar, 28 nov. au 4 déc.

For the western center of Benin, under soudanian climate, one of the objectives of AMMA project is to better estimate the surface water budget in the upper Oueme catchment.

Key processes studied are undertaken on a sub-catchment, the Donga watershed (586 km²). The annual average pluviometry observed over the 1950-2003 period is 1300 mm (1150 mm over the 1970-2003 period). Sixty percent of the rains are recorded between July and September. The potential evapotranspiration (PET) estimated by the Penman's method, is 1600 mm/year over the same period; on a monthly scale, it shows a low seasonal variability with a maximum from 5 to 6 mm/day in dry season and a minimum from 3 to 4 mm/day in rain season.

A recent hydrodynamic process study carried out to determine groundwater flux directions. The results show that the groundwater is potentially drained by the hydrographic network. Piezometric observations realised on a local scale, on a hillslope of the Ara catchment (a sub-catchment of the Donga watershed, 13 km²) indicate the presence of a perennial groundwater surmounted by transitory flows which disappear during dry season.

A tracers study was initiated in 2003 to estimate the groundwater contribution to the streamflow. The dissolved element content in groundwater is 3 to 5 times bigger than the stream baseflow. This suggests a contribution resulting into lateral subsurface flow with low residence time. This is in agreement with the hydrodynamic observations. This phenomenon is repeated during the following year (2004) even though pluviometry was lower. This means that the contributions from each compartment are stable for the 2 years. Under flood conditions, one observes an inverse behavior between the hydrogramme and the evolution of the alkaline earth element contents (Ca, Mg, Ba, Sr) and water electric conductivity. The flood peak systematically coincides with a minimum of the element content. A similar fluctuation is observed for most of the main dissolved elements (Si, Na, Cl), except for the K content that behaves independently with smoother fluctuations during the flood and decreases with the drop in water discharge. As observed in other tropical catchments (e.g., Braun et al., 2002), this may be explained by an important influence of the biological cycle during the flow process. The constant ionic relationship between various tracers of deterioration (Ca and Si) indicates a variable contribution of the only reservoir of sub-surface.

The results of these observations are used as a basis for the water discharge deciphering in two compartments (rapid flow and sub-surface flow) in order to establish the hydrological budget. The results show variable contributions (10 to 90 %) for both compartments according to the form of the hydrogramme. Lateral subsurface flow contribution is maximum at beginning and at the end of the flood.

- 3- Kamagaté B., Favreau G., Séguis L. & Seidel J.-L., 2005.** Geochemical approach of streamflow at various time scales in a tropical catchment (Benin, upper Oueme river). Assemblée générale E.G.U., Vienne (Autriche), 24-29 avril 2.

A geochemical approach (major and trace elements) has been used to decipher surface, sub-surface and groundwater flow pattern in a small tropical catchment in Benin, Africa (upper Oueme river). The main objective of this study, part of the AMMA (African Monsoon Multidisciplinary analysis) project, is to better link monsoon (rainfall) variability and water resources within a small, densely monitored representative catchment (585 km²). The catchment basement is made of metamorphic rocks (schist, gneiss) that imprint low ionic contents on surface and subsurface waters (E.C. < 50 µS/cm). Due to longer residence time, groundwater mineralization is logically higher (mean E.C. near 300 µS/cm). These differences, and related ionic and trace elements content variations, are used to discriminate groundwater, subsurface and surface flow process and contribution to streamflow discharge at the flood scale for two successive rainy seasons (2003, relatively humid and 2004, relatively dry).

A single pattern is observed for the two different monitored years. Groundwater contribution to river flow appears to be very low, as revealed by (i) river water E.C. always below 60 µS/cm and (ii) drying out of the river after the monsoon retreat (December – March). This suggests a major contribution of rapid, sub-surface flow to river floods, with low water storage within the basin. Alkaline earth elements (Ca, Mg, Ba, Sr) appear to behave consistently with EC and show a typical, predictive pattern of low content during the peak flood followed by a progressive recovery of the initial, higher content. A similar fluctuation is observed for most of the main dissolved elements (Si, Na, Cl), except for the K content that behave independently with smoother fluctuations during the flood and decrease with the drop in water discharge. As observed in other tropical catchments (e.g., Braun et al., 2002), this may be explained by an important influence of the biological cycle during the flow process. Because the geochemical pattern appears similar for the two years, a constant relative contribution of the various reservoirs is expected on an interannual scale, independently of the monsoon characteristics.

- 4- Kamagaté B., Favreau G., Séguis L., Seidel J.-L. & Le Barbé L., 2004.** «Flux nappe - rivière en milieu tropical de socle au Bénin (haut-Ouémé)» in 20ème colloque de Géologie Africaine, 2-7 juin 2004, Orléans, France.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) dont l'un des objectifs est d'identifier et analyser les processus entrant en jeu dans les mécanismes de la mousson africaine, en relation avec la dynamique des ressources en eau. Notre travail de recherche vise à mieux contraindre l'estimation du bilan hydrologique du bassin versant de la rivière Donga (585 km²), dans la Haute vallée de l'Ouémé. La zone étudiée se situe au centre ouest du Bénin, en zone de socle (gneiss et schistes), sous climat soudanien à saisons contrastées (1300mm.an⁻¹ en moyenne). Un suivi hydrodynamique dense a montré que les réservoirs souterrains sont potentiellement drainés par le réseau hydrographique (Kamagaté *et al.* 2005). Afin d'estimer la contribution des ces réservoirs au débit de la Donga, un suivi de différents traceurs chimiques (éléments majeurs, éléments traces) et isotopiques (¹⁸O et ²H) a été initié en 2003 et 2004.

La nappe profonde (10 à 20 m : C.E ~ 300 µS/cm) présente des teneurs en éléments dissous 2 à 3 fois supérieures aux teneurs des nappes peu profondes (2m : C.E < 100µS/cm) et des débits de base (C.E < 100 µS/cm). Ceci suggère une contribution prépondérante à l'écoulement, de flux hypodermiques à faible temps de résidence (Boeglin et Tardy, 1997). Ce modèle est identique pour les 2 années d'observation. En revanche la très grande variabilité isotopique des précipitations et des écoulements de base ne permet pas de confirmer ce modèle.

En période de crues, les alcalino-terreux (Ca, Mg, Ba, Sr), tout comme les isotopes stables de l'eau, évoluent uniformément à la conductivité électrique selon un modèle de fluctuation type : à une brusque chute des teneurs qui plafonne avec le pic de crue, succède un retour progressif aux valeurs initiales d'étiage. Les rapports ioniques constants, existant entre les différents traceurs de l'altération, confirment la contribution en proportion variable du seul réservoir de subsurface. Une fluctuation similaire est observée pour les autres principaux éléments dissous (Si, Na et Cl) sauf pour K dont l'évolution semble indépendante des fluctuations limnimétriques. Cette particularité de K serait le fait d'une forte influence du cycle biogénique (Braun *et al.*, 2002).

