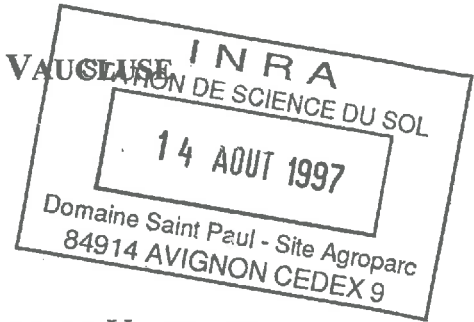


TH- HB 39

ACADEMIE D'AIX-MARSEILLE

UNIVERSITE D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE



THESE

PRESENTÉE A L'UNIVERSITE D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE
POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT

SPECIALITE: HYDROGEOLOGIE

**ETUDE ET MODELISATION DES TRANSFERTS D'EAU,
D'ELEMENTS DISSOUS ET PARTICULAIRES DANS UN
BASSIN VERSANT TORRENTIEL**

**CAS DU RIO BOCONO DANS LES ANDES
VENEZUELIENNES**

PAR
MIRLA CORNIELES

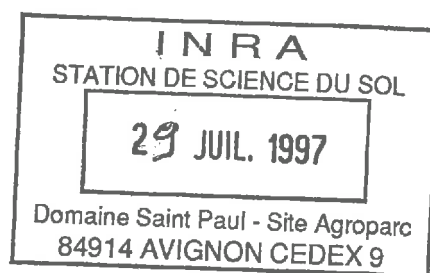
Soutenu le 4 de mars 1997 à 14 heures

devant le Jury composé de:

Blavoux Bernard,	Professeur, Université d'Avignon	Président
Meybeck Michel	Directeur de Recherche, CNRS	Rapporteur
Olivry Jean-Claude	Directeur de Recherche, ORSTOM	Rapporteur
Moussa Roger	Chargé de recherche, INRA	Examineur
Moreau Alicia	Directrice Ministère, Vénézuéla	Examineur
Travi Yves	Maître de Conférence, Univ. Avignon	Directeur de thèse
Valles Vincent	Chargé de recherche, INRA	Directeur de thèse

SOMMAIRE

	<i>Page</i>
<i>AVANT-PROPOS</i>	
<i>SOMMAIRE</i>	1
<i>INTRODUCTION</i>	3
<i>CHAPITRE I</i>	5
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TRANSFERT D'EAU, DE SOLUTES ET MATIERES EN SUSPENSION DANS LE BASSIN VERSANTS TORRENTIELS.	
<i>CHAPITRE II</i>	25
LE MILIEU NATUREL: UN BASSIN VERSANT AUX FORTS CONTRASTES.	
<i>CHAPITRE III</i>	
METHODOLOGIE D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNEES MISE AU POINT METHODOLOGIQUE ET VERIFICATION DE LA QUALITE DES DONNEES	45
<i>CHAPITRE IV</i>	
SPATIALISATION DES CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES: DEFINITION DES UNITES HYDROLOGIQUES, CARACTERISATION DE LEURS SIGNATURES, IDENTIFICATION DES MARQUEURS ET DES TRACEURS.	61
<i>CHAPITRE V</i>	
ETUDE DES MECANISMES DE TRANSFERT D'EAU, ELEMENTS DISSOUS ET PARTICULAIRE LORS DE CRUES DE DEUX TORRENTS.	83
<i>CHAPITRE VI</i>	
ETUDE DES MECANISMES ET TRANSFERTS DANS LES BRANCHES BOCONO ET BURATE: BILANS D'EXPORTATION DES MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES	107
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	163
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	167
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	177
<i>LISTE DES FIGURES</i>	179
<i>ANNEXE</i>	



A Vincent et Luis Roberto

AVANT PROPOS

Par la foi nous comprenons que les mondes ont été formés par la parole de Dieu, de sorte que ce qui se voit maintenant n'a pas été fait de choses qui paraissent. (Hébreux 11.3)

Accompagnée de mes amis de l'Agence de bassin du Río Boconó, Cadafé et de Imparque en mai 1994 je m'initiais à l'étude du bassin versant de Boconó. Notre première «sortie», qui dura 12 heures dans le massif du Guaramacal, fut marquée par la collecte du premier échantillon d'eau et de sédiment du torrent Vitisus et la recherche d'un ours en danger de mort. La suite... vous aurez l'occasion de la lire.

Ce début fut marqué par une collaboration importante sur le terrain ne cessa de se renforcer pendant les deux ans et demi de thèse. Je voudrais souligner tout d'abord l'intérêt montré et concrétisé par Alicia MOREAU, directrice du SAGECAN, qui ne ménagea pas ses efforts pour trouver le financement nécessaire qui me fut accordé par le MARNR. Elle suivit attentivement et patiemment ce travail en me laissant de plus une grande liberté. Merci pour la confiance et l'amitié témoignées durant ces années, elles furent très stimulantes.

La convention entre l'Université d'Avignon et l'Unité de Sciences du Sol de l'INRA Avignon fut le contexte scientifique de cette thèse. Mes sincères remerciements à Laurent BRUCKLER, directeur de l'Unité INRA de Science du Sol, qui me reçut dans son laboratoire de façon désintéressée et se montrant toujours attentif à l'évolution du travail, pour ses conseils pendant les comités de pilotage. Sa lecture de la première version du document fut d'une grande aide.

Je voudrais témoigner mes remerciements à Bernard BLAVOUX, directeur du laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon pour m'avoir accepté en thèse et pour sa participation aux comités de pilotage et au jury de la thèse, malgré ses lourdes charges.

Aux membres du comité de pilotage, Laurent BRUCKLER, Bernard BLAVOUX, Marc VOLTZ, Yves TRAVI, Alain LARAQUE et Vincent VALLES pour leurs précieux conseils et orientations qui me permirent d'atteindre les objectifs de la thèse. Je remercie Alain LARAQUE pour son enthousiasme inébranlable pour ce travail. Aussi mes remerciements vont à Jean-Loup GUYOT pour ses conseils et ses discussions riches de son expérience en hydrologie du milieu andin.

Ma reconnaissance va à M. Michel MEYBECK et M. Jean-Claude OLIVRY qui eurent la responsabilité de juger ce travail; merci pour le temps passé à cette tâche et pour leurs critiques objectives. Je remercie Roger MOUSSA d'accepter de faire partie du jury de thèse, son expérience dans le domaine de la modélisation hydrologique de surface me fut très utile.

Pendant ces années, j'ai eu le plaisir de travailler sous la direction d'Yves TRAVI et Vincent VALLES. Ils surent me transmettre leurs connaissances et patiemment ils m'apprirent à prendre confiance. Les compétences de Yves TRAVI dans le traçage isotopique naturel de l'eau furent précieuses et grâce à ses efforts, cette partie de la thèse reçut un financement international. Malgré ses multiples obligations, il manifesta toujours un réel intérêt pour ce bassin versant. Que Yves TRAVI reçoive par ces courtes lignes mes remerciements les plus sincères; il demeurera une grande amitié. A Vincent, responsable de ce que je connais maintenant en géochimie, sa compétence, sa persévérance et sa patience ont donné beaucoup de fruit dans ce travail. Nous avons découvert ensemble le piémont andin/llanero, les eaux acides de Niquitao et...aussi les délicieux «Bocachicos» de Papito. Mille mercis Vincent.

Je voudrais exprimer aussi mes remerciements à Xiomara, Eloina, Nora, Dalia, Mildre, Mariana et Elia ainsi qu'à tous le personnel administratif de SAGECAN.

A Isabel BACALAO, directrice du Service Autonome de Conservation des sols et des bassins versants et à Antonio LUQUE responsable national du projet MARNR-BID, pour l'aide financière et l'appui logistique durant les missions de terrain.

Si ce travail arriva à son terme, c'est grâce à la participation précieuse et désintéressée de diverses équipes qui conjuguèrent leurs efforts tant sur le terrain qu'au laboratoire. Je suis redevable envers mes amis et collègues de l'agence de bassin du río Boconó et spécialement envers Carlos ARAUJO qui au travers de nos conversations a su me transmettre ses connaissances du bassin, envers Carlos DAVILA qui m'accompagna pendant mes premiers parcours envers Edgar et aussi Nery. Je voudrais exprimer mon amitié à Oscar HERNANDEZ spécialiste de la météorologie et de l'hydrologie du Bocono, qui s'est toujours montré intéressé par ce travail et qui n'a jamais ménagé ses efforts pour me fournir l'information nécessaire. Comment oublier la belle équipe de CADAPE-DESURCA (Société d'électrification) installée à Boconó; que Ramón-Orlando GOMEZ trouve dans ces quelques lignes l'expression de ma reconnaissance pour toute l'aide qu'il m'a apportée (véhicule, canot,.. et même un hélicoptère) pour l'étude du Guaramacal. Merci Ramon. Que Afilio soit aussi remercié pour ce premier échantillon que nous avons récolté grâce à l'expédition au torrent Vitisús.

C'est lors de ma première semaine de mission à Boconó en juin 1994, après presque deux ans d'absence du Venezuela, que j'ai eu l'occasion d'écouter pour la première fois Hector BRICEÑO avec son «cuatro» (petite guitare) et ses chansons qui me permirent de me sentir chez moi. Je ne savais pas alors qu'au delà de ses qualités artistiques, Hector avait de grandes qualités techniques et qu'il allait par la suite être la personne clef pour le barrage de Peña Larga. Disponible 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24, lui et sa voiture, il m'aida à déchiffrer et connaître ce milieu très spécial du piedmont. Mille mercis Hector. Je tiens à remercier aussi Manuel Briceño, par son aide sur le terrain.

C'est grâce au travail réalisé par l'équipe d'hydrologie de l'Université des Andes, et spécialement par Fernando VELASQUEZ et Giovany PEREZ que cette étude a pu aborder les aspects quantitatifs. Que ces lignes soient le témoignage de mon amitié et de mes sincères remerciements à Fernando pour l'aide dispensée.

Je voudrais remercier Anne Marie de COCKBORNE, Gislain SEVENIER et Philippe CARAYON de l'Unité de Science du Sol INRA d'Avignon qui ont été des collaborateurs très efficaces. Leur rigueur dans les analyses et dans la vérification de la qualité des données constituent la base de ce travail. De même pour le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon et à son personnel, à Michel DANIEL pour les analyses d'oxygène 18, à Christophe EMBLANCH et Michael COUREN qui réalisèrent les analyses de cations majeurs malgré le caractère très spécial de certains échantillons.

Un grand merci à toute l'équipe espagnole de l'Université de Zaragoza spécialement à Luis AUQUE-SANZ, qui au vu des premiers résultats sur les eaux acides de Niquitao ne résista pas à la tentation d'analyser les terres rares. Merci, Luis pour ton amitié et pour tes innombrables paroles d'encouragement pendant des années. Je ne voudrais pas oublier Prof. Vicente SANCHEZ qui m'aida pour les déterminations pétrographiques et Pedro LOPEZ pour la visite guidée du bassin de Arroyo del Val qui m'initia aux processus chimiques des sols hyper-acides.

Je tiens à remercier spécialement le laboratoire de biogéochimie isotopique de l'Université de Paris VI, dirigée par le Prof. André MARIOTTI qui a aimablement permis les analyses de carbone organique d'un grand nombre d'échantillons de sédiments et à Michèle GRABLI pour les analyses de carbone sur les végétaux. Merci aussi à Sylvain HUON pour sa collaboration inestimable dans le domaine du traçage isotopique au carbone-13, technique qui s'est avérée déterminante. Il a su me transmettre sa passion pour cette approche. Ton amitié m'est précieuse Sylvain.

A Alain AVENTURIER du CIRAD Montpellier et Bernard REYNIER du CNRS Toulouse pour leur contribution dans le domaine des analyses des terres rares, à Madame DELAUNE de l'ORSTOM Bondy ainsi que Lucien ROGER de l'ENSAM-INRA Montpellier pour les études de rayons X. L'efficacité de Lucien n'a d'égale que son caractère agréable.

S'il est une chose qui demeure après les épreuves se sont les marques d'amitié des amis et je voudrais consacrer les paragraphes suivants à tous ceux qui, sous une forme ou une autre, m'ont aidée. Je voudrais exprimer ma gratitude à M^{me} Blanca DURAN qui m'hébergea toujours amicalement, moi et ma tribu, dans sa maison à Bocono. A Vidal SAEZ qui s'est toujours montré disponible et efficace pour la recherche des données météorologiques; son amitié a vaincu même la distance. Je voudrais remercier spécialement Jesus PEREZ qui me guida jusqu'à Avignon; ni lui ni moi ne savions ce qui m'attendait dans ce premier contact. A mes amis Olivier RIBOLZI de qui je garderai un très bon souvenir... et aussi une simulation graphique de la crue en régime torrentiel; merci Olivier pour tes conseils et pour avoir accepté de lire la première version.. Pas mal!! A Béatrice GARCIA qui a su m'aider au laboratoire et qui m'a témoigné son amitié. A Alain FAURE dont j'ai partagé le bureau, son humeur toujours égale, ses racines (pardon!! ses toiles d'araignées), la C15... A Colette RODE et Nicole SOUTY pour leurs gestes d'amitié. Aux BARBIERO, Laurent et Sonia, merci pour les moments passés ensemble. A mes amis du laboratoire de science du sol, Claude DOUSSAN, Dalila MORATH, Catherine NEEL, Laurent GARCIA, Stéphane RUY, Anne SCHNEIDER, Joanne MUSSET, Claude BEIGEL, JeanClaude FIES, François LAFOLIE, Stéphanie PARY, Jacques HOROYAN, Bernard CABIBEL, Bernard BES, Maurice MONJUSIAU, Liliana DI PIETRO, Chantal GARS, Janine BONNEAU, Alain ORIOL, Patrick BERTUZZI, André CHANZY, Pierre RENAULT, Claude JEANDET, Jean-Claude GAUDU, Michel BOURLET et le personnel de la documentation, un grand merci pour l'ambiance.

A mes frères et soeurs en Jésus Christ qui m'assistèrent pendant plus de quatre ans par leurs prières, a Maritza TORRES qui en plus d'être ma meilleure amie collabora aussi sur le terrain; merci pour ta persévérance dans ton témoignage qui a aidé à profiter de la présence de Dieu dans ma vie. A Maria de SANTANA, avec qui j'ai vécu ensemble de grands moments de foi; son amitié m'est précieuse. A Tesfaye CHERNET, avec qui je partage la foi et de longues et bonnes discussions. A Natacha GUERIN-DACHKEVITCH, une de mes soeurs françaises préférées. A Catherine CHRISTIN qui entre Brésil et France me soutient par ses prières. A l'église Evangélique Libre d'Avignon, les églises baptistes de Caracas et de Bocono, mes sincères remerciements.

A Elisabeth LAQUES et Philippe pour leur amitié et leur appui en Avignon, je ne les oublierai pas.

A mes amis vénézuéliens de Toulouse avec qui j'ai partagé de bons moments, José et Afroditia RIOS, Beatriz MORENO, Carmen MORENO, Jajaira OBALLOS, Juan et Yolanda GONZALEZ, Maribel SILVA, Lucia et Enrique LOBO, Alejandro SANZ, Alexandra et Armando BLANCO, à tous merci.

A mes parents, a papa qui malgré son âge n'a pas hésité une minute à m'aider sur le terrain, à mes soeurs et frère, Roberto, Ingrid, Maria Alejandra, Berthica pour qui, et grâce à la distance, j'ai compris à quel point je les aime et ils m'aiment. A Luis Roberto qui a toujours été ma plus belle inspiration, merci mon fils pour ta patience et ton amour. C'est à eux que je dédie ce travail.

...Nous nous lèverons, et nous monterons à Béthel; là, je dresserai un autel au Dieu qui m'a exaucé dans le jour de ma détresse, et qui a été avec moi pendant le voyage que j'ai fait. Genèse 35:3.

INTRODUCTION

Ces dernières années, de nombreux programmes et études ont été entrepris par la communauté scientifique pour affiner les estimations des échanges de matière entre les continents et les océans. Certains éléments tels que le carbone ou l'azote font l'objet d'efforts particuliers du fait de l'implication de certains composés (CO_2 , N_2O) sur le climat (Duplessy et Morel, 1990). Les grands programmes s'intéressent notamment à l'exportation d'eau, d'éléments dissous et particuliers par les grands bassins versants mondiaux, qui constituent un des maillons importants de ces grands cycles biogéochimiques. Ainsi, les grands bassins de l'Amazonie, de l'Orénoque, du Congo, du Niger, etc...font l'objet d'une attention particulière aussi bien pour la quantification des exportations que pour la caractérisation des formes véhiculées (dissoute, particulière, organique, minérale, caractérisation en terme de granulométrie ou de minéralogie,...).

Dans ce contexte les apports de carbone organique du continent vers l'océan revêtent un intérêt particulier car ils constituent un élément important du bilan du carbone. En effet, le carbone organique représente plus de la moitié de l'apport des continents à l'océan (Meybeck, 1993) et 66% proviendrait de la ceinture intertropicale (Stein, 1981). Dans des études récentes Olivry *et al.*, (1993) et Guyot *et al.*, (1993) montrent que l'essentiel des flux de Matières En Suspension (M.E.S.) et d'éléments dissous présents dans les rivières qui débouchent dans l'Amazonie proviennent des Andes, malgré des phénomènes de sédimentation dans les grandes plaines alluviales (llanos) qui séparent les Andes de l'exutoire de l'Amazonie et de l'Orénoque.

Les bassins versants andins qui alimentent ces fleuves comportent de fortes pentes induisant ainsi un caractère torrentiel très marqué des écoulements. Par ailleurs, en zone tropicale montagneuse, le caractère violent des épisodes pluvieux, l'extension des fortes pentes, l'encaissement des cours d'eau qui attaquent les berges, les pratiques agricoles de déforestation, sont autant de facteurs qui interviennent sur les flux d'eau et d'éléments dissous et qui aggravent considérablement l'érosion.

Le but de ce travail est l'étude des mécanismes de transfert d'eau d'éléments dissous et particulière (minéral et organique) dans un bassin andin depuis la ligne de partage des eaux jusqu'à l'entrée dans la plaine ou *llanos*, en essayant d'apprécier l'hétérogénéité spatiale des bilans d'exportation. Il conviendra en particulier de localiser les zones de forte production de MES.

Ainsi, un accent particulier sera mis sur les MES, sur le caractère torrentiel des écoulements en privilégiant le traçage naturel comme outil méthodologique.

Les études hydrologiques réalisées ces dernières années font largement appel au traçage isotopique et chimique pour déterminer l'origine des eaux. Cependant, lorsque la taille du bassin versant augmente, les signaux chimiques, isotopique ainsi que les hydrogrammes s'amortissent (Marc, 1994) et le traçage devient alors plus difficile. De plus en milieu montagnard tropical, la violence des pluies alliée aux fortes pentes induit des écoulements turbulents propices au mélange des eaux ce qui pourrait atténuer les signaux chimiques ou isotopiques. La problématique de changement d'échelle pour le traçage isotopique et chimique se pose alors avec acuité. Dans ce contexte tropical, torrentiel et de grande surface réceptrice, les traceurs habituellement utilisés tels que ^{18}O ou la silice aqueuse ne sont pas forcément les plus efficaces et il conviendra de rechercher les traceurs ou les marqueurs les plus adaptés à ces milieux.

Le site retenu est le bassin versant du Río Boconó situé dans les Andes vénézuéliennes et alimentant l'Orénoque par l'intermédiaire du Río Apure. Ce bassin versant de 1 540 km² repose sur une lithologie variée constituée de roches cristallines profondes et des

roches sédimentaires dont certaines comportent du carbone fossile. Avec l'étagement altitudinal, ce bassin présente une forte variabilité de température, de précipitations annuelles, de végétation et de sols.

L'intensité des processus d'érosion est telle que la durée de vie de la retenue située à l'exutoire de la partie andine semble fortement réduite. Aussi, au-delà de l'intérêt scientifique, cette étude est aussi motivée par une problématique environnementale de protection de la ressource sol et des aménagements hydrauliques. Des outils simples et efficaces pour le traçage des eaux devront être proposés aux gestionnaires de cette zone qui est considérée comme prioritaire par le Ministère vénézuélien de l'Environnement et des Ressources Naturelles Renouvelables (M.A.R.N.R.). De même, un outil de simulation sera bâti, il couplera un modèle d'hydrologie de surface avec le calcul des transferts de soluté voire de matériaux particuliers.

Le premier chapitre sera consacré à un rapide bilan des connaissances sur les études d'hydrologie torrentielle, l'utilisation des traceurs naturels et sur le transport des M.E.S. Les connaissances de base sur ce bassin versant, en particulier au niveau pédologique, géologique et géomorphologique, sont particulièrement réduites; aussi, le second chapitre réalisera une synthèse entre les informations issues de la littérature et une campagne de terrain. Il décrira le bassin et fournira les informations nécessaires à l'étude hydrologique. La description des dispositifs expérimentaux et des méthodes de mesures fera l'objet du troisième chapitre de même que la présentation des outils de modélisation utilisés. Le quatrième chapitre, poursuivra deux objectifs; la distribution spatiale des caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux et des sédiments permettra de définir les grandes unités fonctionnelles du bassin; il visera en outre à définir les grandes familles de paramètres physico-chimiques ou isotopiques susceptibles d'être utilisés comme traceurs ou marqueurs naturels. Le cinquième chapitre abordera les transferts d'eau, d'éléments dissous et particuliers dans deux torrents de surfaces différents, représentatifs des versants de la partie montagnarde du bassin, lors d'une crue. Enfin, le sixième chapitre étudiera les transferts à l'échelle des branches principales du réseau hydrographique, d'abord à l'échelle de quelques crues moyennes puis de façon plus succincte à l'échelle décennale. Un essai de simulation des transferts d'eau, d'élément dissous et particulaire lors d'une crue sur les deux principales branches du réseau clôturera ce travail. Ce modèle permettra de quantifier l'érosion physique et chimique spécifique des principaux sous bassins.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TRANSFERTS D'EAU, D'ELEMENTS DISSOUS ET PARTICULAIRE DANS LES BASSINS VERSANTS TORRENTIELS

Ce chapitre est consacré à un bilan sommaire des connaissances sur les principaux concepts et apports du traçage naturel pour l'étude du fonctionnement hydrologique des bassins versants. L'accent sera mis sur les particularités des transferts de M.E.S. et sur les bassins versants torrentiels. La première partie de ce chapitre sera consacrée aux apports du traçage naturel de l'eau et au marquage pour l'étude des flux dans le bassin versant. La deuxième partie, précisera les mécanismes de transfert propres aux matières en suspension ainsi que les particularités des bassins versants à régime torrentiel.

1.1 Hydrologie de bassin versant: apports du traçage naturel pour l'étude des transferts d'eau et des solutés

Les études de bassin versant naturels ou anthropisés ont été largement développées durant les deux dernières décennies. Ainsi, au cours de ces recherches, la notion de bassin versant a évolué et les acquis au niveau des connaissances sur leur fonctionnement sont importants.

La démarche qui a longtemps prévalu repose sur la notion de *représentativité* du bassin versant essentiellement basée sur les traits physiographiques du bassin: sols, couverture végétale, géologie, et topographie. Ainsi, cette démarche très riche en résultats descriptifs sur la morphologie du bassin pouvait donc être extrapolée aux autres bassins versants possédant des caractéristiques comparables. L'empirisme de cette notion de *représentativité* a été fortement contesté; d'après De Marsily (1990), «*l'absence des lois spécifiques de comportement- absence de loi asymptotique lorsque l'on passe d'une échelle donnée à une échelle inférieure- pour les bassins versants*» cet argument ainsi que d'autres montrent la difficulté d'extrapoler les résultats aux autres bassins versants malgré leur ressemblance.

Ces critiques ont conduit à une nouvelle approche basée sur la mesure de variables physiques et chimiques pour mieux cerner le fonctionnement du bassin versant. Les études se sont alors orientées sur des bassins de petite taille avec un lourd appareillage de terrain, comme dans le cas de Bassins Versants de Recherche Expérimentale (B.V.R.E.) Réal Collobrier (Martin, 1986; Marc, 1994; Marc et Travi, 1992) ALLEGRO-Roujan (Andrieux *et al.*, 1993; Voltz *et al.*, 1994; Ribolzi, 1996) et CORMORAN-Naizin (Durand *et al.*, 1991) dans les zones tempérées ou le Booro-Borotu au nord ouest de la Côte d'Ivoire (Fritsch *et al.*, 1987) ainsi que les bassins versants de la Piste Saint-Elie dans la Guyane pour les zones tropicales humides (Bariac *et al.*, 1993; Millet, 1996). Cette démarche a permis d'importants progrès, au niveau des connaissances des mécanismes de fonctionnement hydrologique et des méthodologies. En revanche, d'autres problèmes ont été soulevés comme par exemple l'influence de la variabilité spatiale des paramètres sur la quantification, la problématique de l'origine de l'eau ou celle du changement d'échelle.

1.1.1 Intérêt des études sur bassin versant

Le bassin versant est choisi comme outil privilégié, parce qu'il s'agit d'une unité naturelle bien définie. D'après Pedro (1990), «*elle a une définition spatiale limitée par une ligne de crête continue et définie par rapport à un point précis de passage d'eau*». Par

ailleurs, le bassin versant est aussi formé d'unités fonctionnelles qui constituent des sous ensembles qui ne sont pas juxtaposés, mais qui, au contraire, établissent des liens entre sous bassins ou entre réservoirs. Des flux d'eau, de solutés et de solides s'installent entre ces unités. Pour étudier ces liens depuis des échelles locales jusqu'au bassin, toute une démarche de changement d'échelle s'impose. Cette problématique d'actualité de changement d'échelle est un enjeu scientifique important. En effet, le bassin est un niveau d'organisation intégrateur plus représentatif que des mesures à l'échelle locale. Mais ces dernières restent indispensables parce qu'elles permettent l'étude des mécanismes de façon plus précise ce qui montre la complémentarité entre les approches globales et locales. Enfin, le bassin versant est une unité d'intervention pour les gestionnaires de l'espace. Les questions de changement d'échelle ont reçu une attention particulière dans les dernières années. Il est certain que la démarche d'extrapolation des résultats d'un bassin à un autre est très discutable et la recherche d'une approche qui permettra une flexibilité dans les raisonnements sur les mécanismes de transfert paraît indispensable. Ainsi la démarche de la cartographie emboîtée utilisée largement par les équipes (Wood *et al.*, 1988 et 1990, Ambroise, 1992; Mérot et Bruneau, 1993) présente un grand intérêt dans ce contexte. Elle consiste à choisir d'un bassin versant de taille déterminée. Lorsque la connaissance du fonctionnement du bassin à cette échelle est atteinte, une étape suivante, c'est-à-dire une nouvelle échelle est abordée.

La recherche d'une approche pour l'étude de B.V. peut aussi s'envisager comme une démarche «aggrégationiste - désaggrégationiste » en allant d'une étape globale vers une étape de locale et réciproquement. Ceci permettra à la fois d'identifier les différents mécanismes intervenant dans le bassin versant et de les hiérarchiser.

1.1.2 Le traçage naturel en hydrologie; concepts, intérêt et limites

L'étude de l'origine de l'eau dans un bassin versant est importante car elle constitue la base des calculs de bilans d'exportations de chaque unité fonctionnelle du bassin et des temps de transferts. Elle permet aussi une meilleure compréhension des mécanismes de transferts.

Pour quantifier les différents écoulements qui s'unissent pour alimenter l'exutoire, diverses méthodes de décomposition des hydrogrammes ont été utilisées. Les méthodes de décomposition graphiques reposent sur la morphologie de l'hydrogramme. Habituellement, elles consistent à mettre en évidence des ruptures de pentes, de préférence dans des coordonnées semi-logarithmiques. Ces dernières sont censées traduire un changement de régime et l'arrivée d'une nouvelle contribution. A partir de la linéarisation des courbes par la représentation semi-logarithmique, une extrapolation linéaire est généralement réalisée par segments. Ces méthodes sont donc très empiriques et leurs fondements très critiquables (Hubert, 1989; Fritsch 1992).

Une nouvelle approche quantitative de la décomposition d'hydrogrammes par des traceurs naturels ou artificiels se développe aux débuts des années 70. Les premiers travaux sont attribués à Crouzet *et al.*, (1970). Cependant des recherches dans ce domaine avaient été déjà répertoriées depuis 1954 (Payne, 1988; Marc, 1994).

Le traçage naturel a permis de réaliser de grandes avancées par rapport aux méthodes graphiques, en partie car cette méthode est moins empiriques. Les techniques de traçage ont permis d'approfondir l'étude des mécanismes de genèse des crues et de transferts d'eau dans les bassins versants. En effet, le progrès le plus important a porté sur la participation de la composante «eau souterraine» lors de crue (Visocky, 1970; Nakamura, 1971; Heydarpour, 1974 ; Marc, 1994)

Ainsi, d'après Ambroise (1991), le principe de la démarche de la décomposition par traceurs s'exprime de la manière suivante «*si le débit à l'exutoire peut être considéré comme un mélange d'eaux de qualités différentes, décrites par certaines caractéristiques (physiques, chimiques, isotopiques..) mesurables, la connaissance de la qualité du mélange, pourvu que*

ces caractéristiques prises comme traceurs soient conservatives...». Donc, pour arriver à l'utilisation d'un traceur, cinq conditions doivent être remplies:

① la conservation de la masse d'eau: concerne le débit atteint à la sortie du bassin à chaque instant, ce volume est constitué des différentes contributions qui ont été reconnues au préalable. Lorsque l'on considère des bassins versants de taille croissante, les temps de transferts augmentent. Au delà d'un certain seuil, et lorsque le climat est évaporant, l'évaporation mais aussi les apports et l'infiltration, peuvent altérer le bilan hydrologique au sein même du réseau hydrographique.

② le traceur est parfait: cette condition s'applique à la cinématique des traceurs. Dans le cas des matières solides, les vitesses de cheminement n'ont pas forcément la même cinématique que l'eau, ceci est surtout vrai si l'on considère la granulométrie étendue, comme il convient, pour les bassins versants torrentiels (Meunier, 1991, 1994). Dans ce cas, la granulométrie n'est pas un bon traceur car la cinématique des grains est différente de celle de l'eau, notamment pour les plus grossiers. Cependant, lorsque la vitesse de l'eau est élevée, il est possible d'envisager les M.E.S. comme marqueurs, comme dans le cas des régimes torrentiels.

③ au niveau des interactions avec le milieu: lorsque l'on considère des bassins versants de taille croissante avec des temps de transferts qui augmentent, la possibilité d'évolution des propriétés chimiques de l'eau des solutés et des solides transportés est importante. Ainsi, l'évaporation peut provoquer un fractionnement isotopique et altérer le signal véhiculé par l'eau. De même, les composés chimiques peuvent subir des phénomènes d'interactions tels que la dissolution, la précipitation de minéraux, l'échange ionique avec les argiles transportées, ou encore des processus bio-géochimiques tels que la consommation de nitrates par exemple. Dans tous les cas ces mécanismes conduisent à une altération voire une perte de l'information transportée par le paramètre chimique.

La recherche de traceurs parfaits, non affectés par les processus bio-géochimiques peut être facilitée par diverses méthodes. L'Analyse en Composantes Principales, l'approche géochimique par les diagrammes de concentrations et les diagrammes d'équilibres solution-minéraux.

L'Analyses en Composantes Principales: basée sur la matrice de corrélation, permet de regrouper les éléments présentant un comportement similaire. La matrice de corrélation permet aussi d'identifier à partir des éléments mieux corrélés entre eux, le groupe de traceur potentiels (Auque, 1993).

Le diagramme de concentration représente les variations de concentrations des différents éléments par rapport à un élément de référence. Ce diagramme suggère des mécanismes de contrôle biologiques ou physico-chimiques. Dans le cas de contrôles présumés par la dissolution ou la précipitation de minéraux, les diagrammes d'équilibre thermodynamique permettent de vérifier si ces mécanismes sont réellement actifs. (Vallés, 1985; Barbiéro, 1995,.....)

Ainsi, lorsqu'un élément n'est pas parfaitement conservatif à cause d'interactions modérées avec le milieu, il peut éventuellement être utilisé comme marqueur.

④ différenciation des composantes du mélange: les limites sont liées au rapport entre la variabilité temporelle et la variabilité spatiale. Pour pouvoir différencier les différents réservoirs à partir des traceurs, il faut que la signature des différents réservoirs soit significativement différente.

Il faut aussi que la variabilité temporelle de la signature de chaque réservoir soit faible, sinon, il faut émettre des hypothèses sur la propagation de ces variations de signal qui au bout du compte sont tout aussi imprécises qu'une quelconque estimation des temps de transferts.

⑤ hypothèse du bon mélange: il faut avoir une bonne connaissance de la qualité du mélange. Cette condition suppose qu'à l'exutoire ou au point de mesure, les eaux provenant des différents secteurs soient bien mélangées. Dans le cas de grandes rivières, il est notoire que le mélange est difficile à réaliser, il ne se produit que longtemps vers l'aval (Gimeno-Serrano, 1991).

La méthode présente donc des limites qui découlent de ces conditions d'application.

➤ lorsque des interactions avec le milieu se produisent, les éléments chimiques ne peuvent au mieux être utilisés que comme marqueurs et la décomposition quantitative de l'hydrogramme est impossible. Les informations apportées sont qualitatives.

➤ la variabilité temporelle des signaux: lors de la crue, les réservoirs intervenant sont sensibles aux modifications au cours de l'épisode. L'exemple le plus courant est celui de la pluie, qui peut subir des variations importantes en $\delta^{18}\text{O}$ ou $\delta^2\text{H}$. Alors, les conditions initiales du signal changent et celles-ci interviennent dans les calculs de leur relation avec le débit (Ribolzi, 1996)

➤ en fait peu de paramètres sont conformes aux conditions d'utilisation. Il en résulte un nombre de traceurs souvent restreint et une impossibilité de distinguer un nombre suffisant de réservoirs ($n+1$ réservoirs peuvent être distingués au maximum par n traceurs). En effet, l'intérêt de multiplier le nombre de traceurs peut être utile. D'abord, la complémentarité de l'information, certainement dès que le nombre de traceurs (qui atteignent les conditions annoncées précédemment) augmente, les différentes hypothèses sur l'origine de l'eau pourront être confrontées. Finalement, la diversité de traceurs permet aussi de renseigner sur les différents réservoirs contributifs lors d'une crue; ceci évitera les raisonnements simplificateurs, parfois dichotomiques sur l'origine de l'eau.

➤ l'atténuation des signaux qui conduit à des signaux plats à l'aval, surtout s'ils sont peu marqués; c'est le cas lorsque la différence de signature entre réservoirs est faible et le transfert du signal est long.

➤ un autre aspect à prendre en considération est le coût analytique surtout quand le pas de temps utilisé dans l'échantillonnage est serré.

En conclusion, le nombre de traceurs qui respectent les conditions d'utilisation sont réduits. Parmi les espèces chimiques qui ne remplissent pas exactement ces conditions, certaines espèces chimiques dissoutes et particulières peuvent être éventuellement utilisées comme marqueurs. Elles donnent des informations qualitatives, mais sont utiles car elles permettent de vérifier les résultats obtenus par les traceurs. Pour de nombreuses raisons le traçage peut être difficile (conservativité des traceurs, interactions avec le milieu...) surtout quand la taille du bassin versant augmente.

1.1.3 Applications du traçage et du marquage naturel en hydrologie

Les principaux traceurs utilisés pour déterminer le cheminement de l'eau, sont les traceurs isotopiques naturels. De nombreux chercheurs ont utilisé l'abondance isotopique de la molécule d'eau en ^{18}O et ^2H (Blavoux, 1978; Fontes 1976; Pearce *et al.*, 1986; Hubert, 1989; entre autres). Les résultats ont permis de montrer l'opposition «eau préexistante/eau nouvelle» et plus spécifiquement l'importance, qui longtemps a été négligée, de la participation de l'eau préexistante pendant les crues (Blavoux, 1978; Mc Donnell *et al.*, 1991). Ce traçage a été utilisé dans différentes conditions géologiques, climatiques et pour différentes tailles de bassin. Etant donné que le nombre de traceurs conservatifs est réduit, beaucoup de chercheurs ont utilisé les isotopes stables de l'eau en combinaison avec des espèces chimiques pour une approche plus fine du cheminement de l'eau, Marc (1994) a synthétisé dans le tableau I.1 les principaux résultats de décomposition utilisant le traçage par isotopes stables de l'eau et autres espèces chimiques.

Tableau I.1
Synthèse des résultats de décomposition d'hydrogrammes sur bassin versant depuis
1986 (d'après Marc 1994)

Références	Pays-Région	Taille du bassin (km ²)	Pluviométrie	Type de perturbation	Traceur (s)	% eau préexistante	Modèle 3 composantes	
							% nappe	% sol
R.P. Hooper and C.A. Shoemaker (1986)	USA, New Hampshire	0,42	N.C.	pluie et neige	¹⁸ O silice	75 75		
M.M. Obradovic and M.G. Sklash (1986)	Canada, Northwest Territories	60	432,6 mm/an	pluie et neige	¹⁸ O Mg	60 50		
J.V. Turner <i>et al.</i> (1987)	Australie	0,82	1220 mm/an	pluie	¹⁸ O ² H Cl	69 - 95 74 - 92 60 - 84		
A. Rhode (1987)	Suède	0,03 - 6.6	N.C.	pluie et neige	¹⁸ O	41 - 100		
B.R. Swistock <i>et al.</i> , 1989	USA, Pennsylvanie	2,08	1350 mm/an	pluie	¹⁸ O Al		75 - 90 65	6 - 25 30
M.D. Loye-Pilot et C. Jusserand (1990)	France, Corse	0,33	N.C.	pluie	¹⁸ O	70		
C. Wels <i>et al.</i> (1991)	Canada	N.C.	1000 mm/an	pluie	² H Mg, silice	72 > 90		
J.J. Mc Donnell <i>et al.</i> (1991)	Nelle Zélande	0,038	2600 mm/an	pluie	² H, Cl, conductivité	90	80	12 - 16
O.O. Ogunkoya and A. Jenkins (1993)	Ecosse	9,98	1100 - 1500	pluie	² H, Cl		66	19
P. Durand <i>et al.</i> (1993)	France, Cevennes		1950 mm/an	pluie	¹⁸ O silice	46 - 85 43 - 82		
H.B. Pionke <i>et al.</i> (1993)	USA, Pennsylvanie	7,4	1164 mm	pluie	¹⁸ O silice Na Cl Mg	45 - 94 46 - 88 51 - 81 70 - 94 66 - 99		
K.N. Eshleman <i>et al.</i> (1993)	USA, Virginie	45,1	N.C.	pluie	Cl	62 - 89		
U. Matsubayashi <i>et al.</i> (1993)	Japon	0,64	N.C.	pluie	conductivité ¹⁸ O	25 - 73 72		
J.P. Jordan (1994)	Suisse	12	1250	pluie	¹⁸ O	45 - 75		

L'utilisation du traçage chimique en hydrologie a permis d'importantes avancées dans la connaissance de l'origine de l'eau lors de crue (Ribolzi, 1996). Une connaissance des caractéristiques hydrochimiques des unités fonctionnelles qui constituent le bassin versant apparaît comme une condition indispensable au moment d'envisager le traçage chimique lors de la crue. C'est à partir de cette caractérisation qu'il est possible de distinguer des «pôles chimiques». Ce postulat a permis aux chercheurs Christophersen *et al.*, (1990) de proposer l'approche EMMA (End-Member Mixing Analysis). Cette méthode consiste à identifier des «bornes hydrochimiques» (il s'agit généralement de trois bornes) constantes avec la combinaison de paramètres conservatifs; ce mélange désignera le comportement à l'exutoire du cours d'eau. Les analyses s'effectuent sur des diagrammes de mélange basés sur des mesures de concentrations en espèces chimiques présentes dans les prélèvements du cours d'eau. Sur le plan XY les espèces chimiques seront croisées.

Lorsque les bornes sont identifiées, les prélèvements réalisés sur le cours d'eau seront placés dans le triangle du mélange formé par les trois pôles (fig. I.1). La quantification des contributions de chaque borne peut être estimée si le nombre de bornes est >0 sur le calcul de moindres carrés (Christophersen *et al.* 1990) ou par la résolution d'une équation à trois inconnues (Ogunkoya et Jenkins, 1993). Le problème se pose par rapport à la position des points (échantillons) hors du triangle car il se peut que le mélange ne soit pas conservatif, comme c'est le cas des grandes rivières ou encore qu'il existe la variabilité spatiale du pôle (pluie) ou tout simplement la mauvaise caractérisation du pôle.

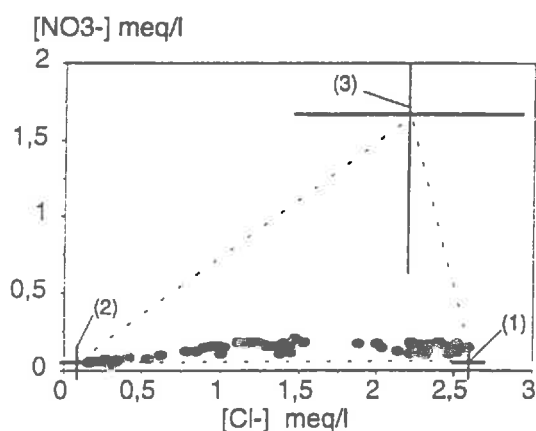


Figure I.1: Exemple de diagramme de mélange (EMMA) à trois pôles: (1) nappe de la dépression, (2) ruissellement et (3) nappe du plateau dans un bassin versant cultivé (D'après Ribolzi, 1996).

Une autre méthode envisageable pour l'étude des variations temporelles est l'utilisation de marqueurs spécifiques. L'intérêt de prendre en compte ces paramètres est qu'ils informent sur des processus spécifiques des écoulements. Bien que non conservatifs, leur présence au long du cheminement de l'eau est lié une cinétique comparable à celle de l'eau. Si cette condition est respectée jusqu'à l'exutoire, alors il est possible de considérer cette information sous un angle quantitatif.

Enfin, la décomposition d'hydrogrammes par traceurs est actuellement en hydrologie une méthode très utilisée (Crouzet *et al.*, 1970; Barnes et Allison, 1988; McDonnell *et al.*, 1990; Loyer-Pilot et Jusserand, 1990; Neal *et al.*, 1992; Bariac *et al.*, 1993; Bazemore, *et al.*, 1994; Ribolzi *et al.*, 1996). Les traceurs permettent de suivre le cheminement et l'origine de l'eau et fournissent un moyen très efficace pour quantifier les contributions des réservoirs qui participent lors de crue. Aussi grâce à l'utilisation des traceurs, la distinction entre eaux préexistantes et eaux nouvelles et même la participation de solutions de nappes et du sol lors de la crue a été possible. Eux aussi peuvent rendre compte de processus impliqués dans le

fonctionnement hydrologiques du bassin versant. Cette méthode peut être appliquée à des échelles locales (profil) jusqu'à des échelles de centaines de kilomètres carrés. Pour envisager une décomposition par traçage naturel sur grandes surfaces il faudrait non seulement multiplier les traceurs, mais aussi que ceux qui sont retenus soient bien contrastés pour ne pas craindre un aplatissement du signal. Cependant, il existe des limites et des difficultés d'application de cette méthode d'après Ambroise (1991), elles peuvent rencontrer essentiellement deux difficultés.

➤ un fonctionnement hydrologique complexe car il peut exister des eaux de qualité et d'âge distincts, et aussi lorsque une même eau suit des cheminements différents.

➤ la validation mathématique des modèles sur le terrain. Cependant des solutions à cette difficulté peuvent être apportées. Par exemple, la décomposition par différents traceurs à phases différentes (traceurs particuliers: granulométrie, matière organique, carbone organique particulaire) ce qui permettra une vérification des résultats obtenus.

Les grandes familles de traceurs et de marqueurs

Cette partie de la synthèse bibliographique portera sur la typologie des traceurs et de marqueurs naturels concernant aussi bien les phases aqueuse et gazeuse que les phases solides représentées dans les M.E.S.

Traceurs et marqueurs de la phase aqueuse

Les isotopes de l'eau ^{18}O et ^2H

Les résultats les plus intéressants obtenus avec les isotopes de l'eau ^{18}O et ^2H , ont été la séparation entre l'eau nouvelle attribué à la pluie de l'épisode et l'eau préexistantes contenues dans les nappes ou les sols (Blavoux, 1978; Mérot *et al.*, 1981; McDonnell *et al.*, 1991). Le principal inconvénient rencontré avec ce paramètre est parfois une vision trop simple qui se réduit à la dichotomie entre la pluie et l'eau préexistante (Bazemore *et al.*, 1994); par ailleurs, la variabilité spatiale et surtout temporelle de la pluie peut constituer une gêne importante pour la mise en oeuvre de la méthode. En effet, lorsque le signal isotopique varie dans l'espace et dans le temps, il peut être momentanément égal à la signature d'un compartiment de l'eau préexistante ce qui empêche toute différenciation. Certains chercheurs, ont tenté de résoudre ce problème en appliquant des méthodes séquentielles ou moyennes mobiles dans la décomposition d'hydrogrammes (Marc, 1994 et McDonnell *et al.*, 1990).

La chimie des éléments dissous

Le nombre limité de traceurs pour cette phase est du au comportement non conservatif de la plupart des éléments chimiques. Cependant, les éléments dissous ont été souvent utilisés avec succès pour la décomposition d'hydrogrammes de crue (Eshleman *et al.*, 1993, Ribolzi, 1996). Ce type de traçage permet en particulier de distinguer les origines géographiques des contributions. Ainsi, l'utilisation de l'hydrochimie pour suivre le cheminement de l'eau dans un bassin versants a été réalisé avec le Cl^- (Eshleman *et al.*, 1993; Leaney *et al.*, 1993) le Mg^{++} (Wels *et al.*, 1991; Marc, 1994) ou encore la conductivité électrique ou la silice (McDonnell *et al.*, 1991; Matsubayashi *et al.*, 1994). Les traceurs chimiques et les isotopes stables de l'eau sont souvent associés dans la recherche des origines de l'eau (Pearce *et al.*, 1986; Hubert, 1989, Neal *et al.* 1992; Travi *et al.*, 1994). Malgré le problème de non conservativité de certaines espèces chimiques à cause d'interactions eau/milieu par des processus biogéochimiques, certains paramètres peuvent être utilisés comme marqueur s'ils présentent une variabilité spatiale forte et bien structurée et si leur interactions avec le milieux sont suffisamment lentes à l'échelle temporelle de la crue.

Par ailleurs, la combinaison de paramètres contrôlés, c'est à dire non conservatifs, peut être conservative; c'est le cas de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (A.R.C.) et l'Alcalinité Résiduelle Généralisée (A.R.G.).

L'alcalinité résiduelle a été proposée par Van Beek et Van Breemen, (1973) et inspirée du concept de carbonates résiduels d'Eaton, (1950). L'alcalinité résiduelle est une grandeur algébrique mesurée en équivalents/litre (eq/l). Elle exprime la différence d'équivalents entre l'alcalinité et les cations Ca^{++} et Mg^{++} . L'approche théorique de la conservativité de l'alcalinité résiduelle (Vallès *et al.*, 1990) a été vérifiée sur le terrain en conditions méditerranéenne et tropicale (Ribolzi *et al.*, 1993). L'A.R.C. est un cas particulier de l'alcalinité résiduelle: $\text{A.R.C.} = \text{Alc} - \text{Ca}^{++}$ (le tout étant exprimé en eq/l).

L'A.R.G.

Lorsque plusieurs précipitations minérales surviennent, notamment pour les eaux assez concentrées, l'Alcalinité résiduelle n'est plus conservative et il convient d'utiliser l'alcalinité résiduelle généralisée. La conservativité de l'A.R.G. a été montrée dans des cas très divers, tels que l'A.R._{calcite+fluorine} dans le cas du Niger (Barbiero, 1995) ou de l'A.R._{calcite+gypse+mirabilite} en Espagne (Vallès *et al.*, 1996).

Les travaux récents (Ribolzi *et al.*, 1996) ont montré que l'AR est susceptible d'être utilisée comme traceur en hydrologie avec une précision parfois supérieure à celle de l' ^{18}O .

Marqueur de la phase gazeuse

Le CO_2 : dans un sol il peut y avoir production et consommation de CO_2 ainsi que des échanges avec l'atmosphère. Lorsque le sol est gorgé d'eau, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère se font difficilement. Dans le sol la production de CO_2 est attribuée à l'activité biologique (oxydation de matière organique récente et fossile et respiration racinaire). Au contraire la consommation de CO_2 est plutôt le fait de processus chimiques abiotiques (dissolution de calcaire, dissolution de feldspath avec synthèse d'argile). Dans tous les cas, le comportement du CO_2 ne peut être conservatif à cause des échanges continus avec l'atmosphère. La pression partielle équilibrante en CO_2 ($p\text{CO}_2$) ne peut pas être utilisée comme traceur mais comme marqueur (Durand *et al.*, 1991; Ribolzi, 1996). La pression partielle en oxygène peut être utilisée comme marqueur de transferts d'eau (Garcia, 1996). De manière plus globale, des flux d'exportation de CO_2 ont été réalisés, par exemple sur le fleuve Niger (Amiotte *et al.*, 1993)

Marqueurs de la phase solide

Le marquage du flux de M.E.S., minéral ou organique, a fait l'objet d'une attention particulière à cause notamment de son importance pour la quantification de l'érosion et des processus de sédimentation ainsi que son lien avec les grands cycles biogéochimiques planétaires. (Olivry, 1977, 1989, et 1990; Olivry *et al.*, 1993; Degens *et al.*, 1991; Meybeck, 1993). Les travaux sur les M.E.S débutent généralement par la mesure de leur concentration et du flux hydrique.

La première différenciation opérée au sein des M.E.S., consiste dans un premier temps à quantifier les proportions relatives des matières minérales et des matières organiques. Les études plus fines menées sur l'une ou l'autre de ces deux composantes reposent sur des démarches et des analyses très différentes. Aussi, les paragraphes suivants porteront successivement sur ces deux types de composés; le premier concernera des M.E.S. minérales et la deuxième portera sur les composés organiques.

La minéralogie, la granulométrie et la couleur des matières minérales

Ces paramètres ont été utilisés par de nombreux chercheurs dans une gamme variée de milieux naturels, de composés chimiques ou minéralogiques. Le but de ces marquages spécifiques aux matières minérales est de connaître l'origine des sédiments ainsi que leur processus de transport.

Au sein des M.E.S. minérales, les paramètres mesurés et les méthodes analytiques sont assez variables, mais habituellement, ces déterminations ne portent pas sur la totalité du sédiment. Des techniques de séparation sont utilisées. Ainsi, un premier fractionnement peut être réalisé par séparation granulométrique ou densimétrique. La séparation selon la classe

granulométrique est de loin la plus utilisée. Les mesures minéralogiques, par rayons X notamment, ou de teneur en élément chimique portent alors sur une seule fraction. Quelques cas font exception; Ribolzi (1996) utilise des marqueurs spécifiques de type minéralogique par mesure sur la totalité des M.E.S.

La minéralogie d'une tranche granulométrique bien définie peut renseigner efficacement sur l'origine des M.E.S. (Kattan *et al.*, 1987; Giresse *et al.*, 1990; Olivry *et al.*, 1993 et 1995; Laraque *et al.*, 1996, Censier, 1993; Guyot *et al.*, 1993). Les fractions les plus fines, le plus souvent constituées de minéraux argileux, sont les plus étudiées. Ainsi, les proportions relatives d'illites, de smectites, éventuellement de quartz ou de feldspaths, ont été utilisées pour mettre en évidence l'origine spatiale des sédiments.

Une séparation des minéraux par densité puis leur étude minéralogique a été utilisée avec succès dans certains fleuves africains (Censier, 1993; Censier et Olivry, 1993). L'étude des sables a concerné plus particulièrement les minéraux lourds transparents de la fraction granulométrique 80 μm -160 μm . Ce marquage très élégant est assez convaincant surtout lorsqu'il met en relation la proportion des divers minéraux avec une étude de sensibilité à l'érosion des unités paysagiques. Cette problématique a été développée à l'occasion des grands programmes scientifiques: PIRAT-Programme Interdisciplinaire de Recherches: Géodynamique de Milieux Intertropicaux Périatlantiques-INSU/ORSTOM (Olivry *et al.*, 1993); PEGI- Programme Environnement Géosphère Intertropical- INSU/ORSTOM (Olivry *et al.*, 1990) PECOR-NSF-Projecto del Ecosistema Orinoco- National Science Foundation (William, *et al.*, 1987), ainsi les grands bassins fluviaux comme le Congo, le Niger, l'Amazonie et l'Orénoque ont pu être suivis.

La couleur est un marqueur peu utilisé. Néanmoins, ce paramètre apparaît intéressant surtout quand les bassins étudiés présentent de forts contrastes lithologiques. Lors de crue, la couleur donne des informations complémentaires par rapport à l'origine des contributions. Ainsi, Ribolzi, (1996), compare la couleur des sédiments à celle des eaux de ruissellement d'un plateau fersiallitique et de pentes couvertes de sols bruns calcaires. Les variations temporelles de la couleur des sédiments à l'exutoire lui permet de confirmer l'origine des M.E.S. déduites de mesures minéralogiques.

Les isotopes stables du carbone (^{13}C) et de l'azote (^{15}N), teneur en carbone et rapport C/N.

Dans les bilans de transfert de carbone des continents vers les océans, la partie qui revient au flux de carbone organique représente plus de la moitié du flux total véhiculé par les fleuves (Meybeck, 1993). Le carbone peut être classé comme: organique et inorganique sous les formes particulaires ou dissoutes. Ainsi on peut trouver le carbone organique particulaire (COP), carbone organique dissous (COD) ou encore le carbone inorganique particulaire (CIP) et le carbone inorganique dissous (CID). D'après Stein, (1981) et Seyler *et al.*, (1993), 66% du carbone organique proviendrait des apports fluviaux de la zone Intertropicale. L'importance du carbone inorganique est connue depuis longtemps Clarke, (1924) et Meybeck, (1993); cependant, le carbone organique présent dans les océans et qui intervient dans les grands cycles biogéochimiques a été remarqué récemment par Schlesinger et Melack, (1981). Les principales sources de carbone apportées par les rivières sont résumées (tableau I.2) par Meybeck, (1993).

Il apparaît important d'étudier les liens entre le transport de matière minérale dissoute et de matière organique dissoute. Différents travaux montrent que des processus de complexation entre le COD et certains éléments dissous peuvent se produire. Verhaeghe et Boulègue, (1993) ont montré le rôle joué par la matière organique dans le transport de l'or en Amazonie. L'importance de ce processus de complexation a été mis en évidence dans l'Amazonie et l'Orénoque Richey *et al.*, (1990) et Nordin et Meade, (1986); Verhaeghe et Boulègue, (1993).

La plupart des programmes de recherches qui traitent la problématique du carbone s'intéressent aux flux qui alimentent les océans à partir des rivières et fleuves (CARBON-SCOPE, Degens *et al.*, (1991)). Cependant, très peu de recherches se sont orientées sur l'étude des variations de concentrations du COP et COD dans les bassins. En revanche, quelques travaux comme celui de Seyler *et al.*, 1993 montrent l'intérêt d'utiliser ces deux paramètres comme marqueurs de l'origine des M.E.S. provenant de deux milieux naturels contrastés, les savanes et la forêt, dans le bassin du Congo. Richey *et al.*, (1990) ont travaillé également sur l'origine, l'étude des processus et l'estimation du bilan pour l'Amazonie, malgré un important échantillonnage réalisé sur cette rivière l'origine du carbone organique provenant de l'amont de l'Amazonie n'a pu être déterminé.

Tableau I.2
Formes spécifiques du carbone présente dans le matériel de rivières
(D'après Meybeck, 1993)

Formes			Origines Principales	Age approximatif (années) *
Carbone	Carbone	CID	- Altération minérale de carbonate	10^8
			- CO ₂ atmosphérique	0-10 ²
Total	Dissous	COD	- lessivage du sol	10 ¹ -10 ²
	Carbone	COP	- érosion du sol	10 ²
			- roches sédimentaires	10 ⁸
Particulaire	CIP	- autochtones	10 ⁻²	
			- roches sédimentaires	10 ⁸

C.I.D. : carbone inorganique dissous

C.O.D: carbone organique dissous-forme spécifique quelques fois affectée par l'activité humaine

C.O.P.: carbone organique particulaire-forme spécifique quelques fois affectée par l'activité humaine

C.I.P. : carbone inorganique particulaire

* âge du carbone transporté par les rivières depuis son intégration par les réactions biochimiques à partir du CO₂ atmosphérique.

Plusieurs méthodes et paramètres sont utilisées pour la caractérisation de la matière organique. Le rapport C/N, qui indique le degré d'humification de la matière organique. C'est un paramètre facile à mesurer et relativement précis à condition que le taux de matière organique soit suffisant.

L'isotope $\delta^{13}\text{C}$ est très utilisé actuellement dans l'étude de la dynamique de la matière organique dans le sol; il permet notamment d'étudier la transition spatiale savane-forêt ou bien de préciser la dynamique de la matière organique lors d'un changement de couvert végétale entre plantes du type C3 (forêt) et plantes de type C4 (cultures de maïs et canne à sucre) (Mariotti, 1991; Balesdent, 1993...). En revanche, peu de travaux ont utilisé ce type de traçage en hydrologie. En effet, lors de crue, ce paramètre contribue à la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, à condition qu'il existe au préalable une caractérisation spatiale du carbone dans les différents réservoirs susceptibles de participer à la crue.

Le traçage par ^{15}N , comme le carbone, est aussi utilisé pour la détermination de l'origine de la matière organique et permet donc de mettre en évidence des processus de

transformation. Certaines études ont montré le lien entre la dynamique de l'azote et celle de l'eau dans des aquifères de la zone méditerranéenne (Garcia, 1996).

1.2 Erosion, hydrologie et hydraulique torrentielle

Cette partie du chapitre s'appuie sur la synthèse réalisée par Meunier (1994) et Errezarret (1996). Différencier ces trois concepts semble difficile car entre eux existent des liens étroits qui amènent à une conjonction de mécanismes et processus. Cependant, lorsque l'on considère l'érosion hydrique comme le résultat du cheminement de l'eau dans un bassin versant, alors, il faut faire appel aux concepts d'hydrologie et dans le cas de reliefs montagnard, à l'hydraulique torrentielle. Les progrès sur la connaissance de ces phénomènes torrentiels sont assez récents. L'hydraulique torrentielle est une science nouvelle et la réflexion conceptuelle est encore en plein développement. De manière générale les mécanismes de fonctionnement hydrologique impliqués sont mal connus.

1.2.1 Processus élémentaires de l'érosion des versants

Les principaux processus d'érosion dans les versants sont attribués à la météorisation. L'érosion du versant atteint les roches qui sont attaquées par des facteurs climatiques, essentiellement la pluie, le vent et les différences de températures. L'influence de cette attaque dépend du type de lithologie de l'état de fracturation de la roche selon les plans de fractures et de microfractures. Ces processus peuvent être classés en deux grands groupes. D'abord, ceux qui concernent les actions mécaniques de la météorisation et enfin, ceux qui prennent en considération les aspect chimiques de la météorisation.

La météorisation mécanique consiste à l'éclatement de la roche par une différence de la température ou par l'humidification mais aussi par l'action directe de la pluie. Ainsi il est possible de distinguer:

⇒ la thermoclastie qui est une fragmentation provoquée par de fortes amplitudes thermiques journalières. La dilatation/contraction génère des fortes tensions qui provoquent la rupture de la roche, elle induit une exfoliation pour un calcaire et une désagrégation pour les roches cristallines.

⇒ l'hydroclastie concerne l'alternance d'humidité/dessiccation dans les sols riches en argiles. Elle s'accompagne d'une défloculation et une polygonation de la surface.

⇒ l'impact des gouttes de pluie ou l'effet «splash» occasionne le détachement puis le déplacement des particules du sol. C'est à cause de l'énergie de ces gouttes qu'un petit volume du sol peut être séparé. L'érosivité de la pluie varie dans le temps en fonction de l'intensité des précipitations et atteint un maxima pour les pentes à 33%. De plus, les gouttes de pluie augmentent la capacité de transport de l'écoulement par la mise en suspension de particules déjà désagrégées

La météorisation chimique concerne l'altération de la roche par des processus chimiques essentiellement par la transformation des constituant minéraux de la roche. En effet, il est possible de distinguer:

- l'action physico-chimique: la dissolution est d'autant plus grande que les précipitations sont importantes et les températures élevées. Les roches peuvent ainsi se classer sur une échelle depuis les plus sensibles comme les calcaires jusqu'aux moins sensibles comme les granites et certaines roches métamorphiques. La conséquence de cette altération est le changement de concentrations des eaux lors de la dissolution des roches. Ils vont affecter les concentrations initiales et donc l'information des paramètres chimiques s'altère.

- l'action biologique et anthropique: l'intervention des organismes vivants et l'action anthropique dans la désagrégation superficielle du sol ne doivent pas être sous estimées. L'homme contribue aussi activement à l'instabilité des versants par une activité agricole intensive ou inadaptée.

1.2.2 Le régime torrentiel: définition et caractérisation

La recherche sur la phénoménologie torrentielle est relativement jeune, même si les particularités de ces phénomènes sont répertoriées depuis longtemps (Varnes, 1958; Sauret et Colas, 1986; Meunier, 1994). Ainsi, ils ne sont étudiés que depuis les années 70 aux Etats-Unis (Johnson, 1970) et au Japon (Takahashi, 1978). En France ces études démarrent à peine dans les années 90 en réponse aux nécessités pratiques des géologues et géomorphologues face à des phénomènes exceptionnels.

Attribués aux milieux montagnards, les torrents sont différenciés du régime de rivières essentiellement par deux aspects: le fonctionnement hydrologique et la morphologie.

- le régime hydrologique qui est caractérisé par l'irrégularité du débit lors de la crue comme lors de la décrue; des événements marqués par la rareté qui donnent souvent des épisodes catastrophiques, la variabilité des charges transportées et la modification du lits et de berges (Meunier, 1991).

- la morphologie est notamment constituée par un chenal aux fortes pentes avec une longueur du lit courte et un profil irrégulier et accidenté. La distinction entre les différents types de cours d'eau peu être réalisée à partir de la pente du lit:

Tableau I.3
(d'après Thierry, 1914 et Meunier, 1991)

Type de régime/source	Pente du lit
rivières	pente < 1,5%
rivière torrentielle	1,5% < pente < 6%
torrent	pente > 6%

L'origine de matériaux solides est elle aussi différente selon que l'on considère le cas de l'hydraulique fluviale ou de l'hydraulique torrentielle. Pour l'hydraulique fluviale les solides sont fournis par des zones contributives localisées à l'amont de l'exutoire du bassin ce qui induit des distances de transfert plus importantes; le rapport entre les débits liquide et solide se maintient dans proportions faibles. La fourchette granulométrique est plus resserrée. En revanche, en hydraulique torrentielle, les écoulements se suivent très rapidement (Meunier, 1991) compte tenu des distances courtes et de la proximité des zones contributives entre elles. Les types d'écoulements sont assez hétérogènes, ils peuvent transporter des tailles granulométriques très étendues allant des colloïdes aux galets ou aux blocs qui peuvent atteindre l'échelle métrique. Les écoulements torrentiels se caractérisent en particulier par leur violence car ils dépassent souvent les seuils de l'érosion des versants et du lit. (Meunier, 1991; 1994; Bois et Koulinski, 1994; Lefort, 1991). Autrement dit, la source de solides dans ces écoulements provient de l'arrachement et de l'écroulement de surfaces importantes des versants aussi bien que du lit même du cours d'eau. En effet, quand la teneur en eau est faible avec une cinétique lente, alors le processus est du domaine de mouvement de terrains. Mais dès que la proportion d'eau augmente et que la cinétique s'accélère apparaissent en ordre croissant, d'abord, les laves torrentielles ensuite les écoulements hyperconcentrés puis les concentrés et enfin la suspension et le charriage.

L'article de Meunier, (1994) a fait la synthèse de connaissances acquises jusqu'à ce jour, cette recherche sera utilisée ici pour appuyer les paragraphes suivants. C'est elle qui sert de base à la typologie qui suit.

1.2.3 Typologie des transport solides dans le chenal d'écoulements

Les domaines respectifs d'étude de l'hydraulique torrentielle par rapport à l'hydraulique fluviale sont définis dans la figure I.2. Les événements torrentiels se différencient entre eux par le type de matériaux transportés. Ce qui caractérise les transferts des matières en

suspension (M.E.S.) dans le régime torrentiel, c'est la grande diversité des mécanismes de transport et des états de mélange liquide/solide. Meunier, (1994) classe les différentes situations par rapport à deux critères:

- >le caractère granulaire ou cohésifs du matériau qui est étroitement lié à la granulométrie. Les fortes teneurs en argile induisent plutôt un comportement cohésifs, tandis que les teneurs fortes en matériau granulaire ont un comportement particulaire.
- >le rapport Q_s/Q_l , Q_s étant le débit solide et Q_l le débit liquide; ce paramètre comparable aux taux de matières en suspension permet de classer les écoulements par charge croissante en solide.

Pour récapituler, il existe un domaine de transport de matériaux fins et cohésifs et un autre domaine qui concerne les fractions granulaires. Dans les deux domaines la proportion d'eau impliquée dans le transport permettra de fixer les limites des différents phénomènes torrentiels. Une attention particulière sera accordée au domaine granulaire car il concerne plus particulièrement cette étude. Cependant, il faudra noter que la différence plus remarquable entre les deux domaines concerne essentiellement les proportions d'eau et solides dans le mélange. Ces proportions vont déterminer les équations utilisées pour le calcul des concentrations, dans le cas de laves torrentielles et du débit pour les écoulements concentrés et hyperconcentrés. C'est en fonction de ce mélange et du type de matériaux que se distinguent les écoulements monophasiques et biphasiques.

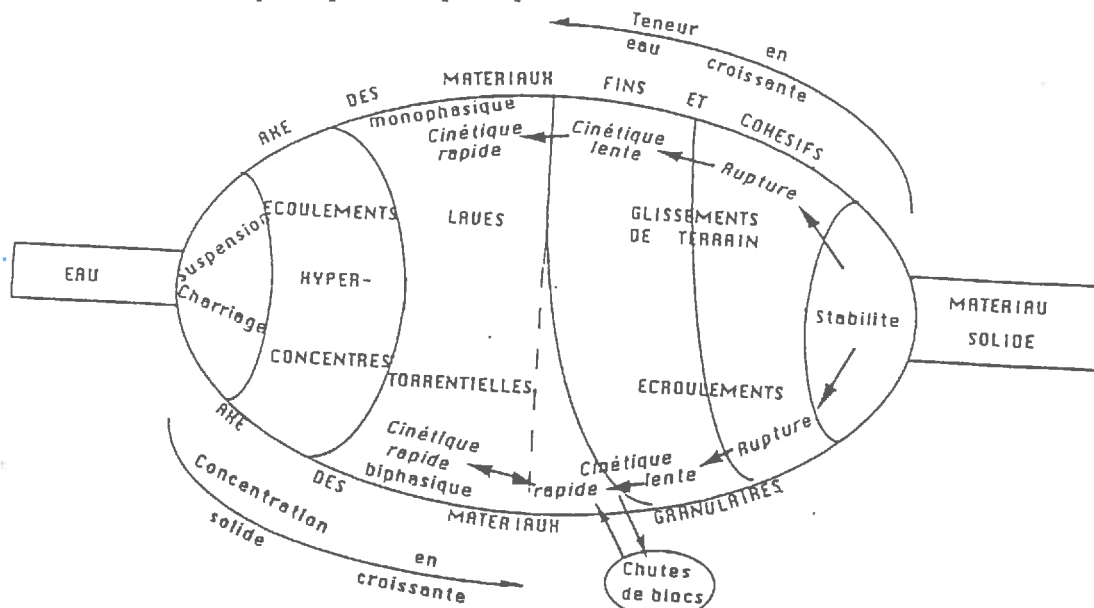


Figure I.2: Les différents types de transports solides (d'après Meunier, 1994)

Les flux biphasiques sont typiques de l'hydraulique fluviale. Ils ont comme support l'eau et comme élément dérivé le transport solide. Ils peuvent être dissociés dans une large mesure. Dans cet état les écoulements sont régis par la loi de comportement newtonienne pour le fluide et les forces hydrodynamiques et de turbulence pour le transport de matériau solide. Cependant ces types d'écoulements, ne sont pas exclusifs des rivières, ils peuvent intervenir dans certains types d'écoulements torrentiels et les postulats valables pour la hydraulique fluviale sont valables en hydraulique torrentielle jusqu'à certains seuils de transport solide. En revanche, les flux à état monophasique caractérisent les phénomènes torrentiels typiques, comme par exemple, les laves torrentielles. Il s'agit de flux dans lequel les proportions d'eau et des solides dans le mélange évoluent au profit de ces derniers. Alors les hypothèses d'hydraulique fluviale doivent être revues. D'après Meunier, (1991) ces flux :

- sont monophasiques malgré l'existence de deux composantes.

- alors si on considère le flux en état monophasique, il faudra le traiter dans sa totalité (eau plus les solides) dans les mesures de hauteur d'eau.

- dans le cas ces flux sont monophasiques ou biphasiques, la torrentialité du milieu fait qu'il n'ont plus un comportement newtonien (fig. I.3)

- des forces internes nouvelles interviennent; si le flux est monophasique alors les forces électrochimiques des argiles devront être prises en compte, en revanche, si celui-ci se présente en état biphasique ce sont les effets de collision entre les galets et les dérives du changement de trajectoire du lit qu'il faudra considérer.

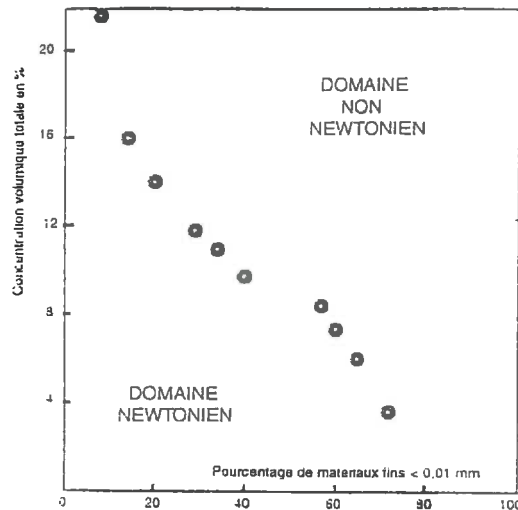


Figure I.3: Domaine des comportements newtonien et non newtonien (d'après Quian Ning et Wan Zhaohui, 1986).

Ainsi une typologie des écoulements torrentiels peut être établie. Elle s'effectuera en deux sens, par rapport à la concentration du transport de solides par charge solide décroissante. Le second paramètre prendra en considération le caractère newtonien ou non newtonien de l'écoulement.

Le premier écoulement à forte concentration solide est la lave torrentielle. Ce travail ne détaillera pas les études sur ce phénomène particulier, il accordera plus d'importance aux écoulements hyperconcentrés ou concentrés qui sont plus fréquents dans le cas étudié. Cependant, il semble utile de préciser quelques points sur les laves torrentielles.

- le déclenchement de ces écoulements se fait sur des pentes supérieures à 25% ou 30%, c'est à dire, à l'origine de la rupture de pentes par des mouvements de terrain.

- elle se classe selon le type de matériau selon qu'il est cohésif ou granulaire (laves boueuses ou laves granulaires respectivement) avec un écoulement saccadé.

- la concentration dans ces écoulements se fait en volume $C_V = V_s / (V_s + V_l)$ où V_s et V_l sont les volumes solides et liquides; les fortes densités rencontrées se chiffrent entre 1,4 à 2,4.

- la viscosité du flux est souvent marquée par un caractère non newtonien

L'écoulement hyperconcentré est difficilement distingué des laves torrentielles. Néanmoins, il est caractérisé par un écoulement permanent et une augmentation de la concentration en solide. Les critères qui amènent à une distinction entre ces deux types des écoulements sont:

- le tri granulométrique exercé par les écoulements hyperconcentrés et qui est absente dans les laves torrentielles.

- la mesure de concentration se fait en fonction du rapport Q_s/Q_l qui varie de 1% à 40%. Si on convertit ces pourcentages en concentration volumique on obtient une fourchette

qui va de 0,01 à 0,25 qui se situe bien au-dessous du seuil inférieur des concentrations volumiques des laves torrentielles.

➤ c'est dans le domaine non newtonien qui se localisent ces types d'écoulements

Les écoulements concentrés sont étudiés par l'hydraulique fluviale (fig.I.2), car la charge en solides est beaucoup moins importante que les deux phénomènes décrits précédemment. Cependant, avant d'arriver à ce stade, il faudrait considérer certains mécanismes pour caractériser cette relation biphasique entre le mouvement de l'eau et le mouvement du matériau. Ainsi, deux approches seront développées, la première concerne une démarche française et l'autre plutôt anglo-saxonne.

L'approche française: la suspension et le charriage.

➤ la suspension se réalise quand la composante turbulente de la vitesse de l'écoulement, dirigée vers le haut, est supérieure à la vitesse de chute des particules solides, cette vitesse dépend du diamètre des particules transportées (poids) et de la viscosité du liquide.

➤ le charriage concerne le transport du fond, par saltation ou roulement d'un matériau non cohésif. Il apparaît lorsque l'action du courant provoque l'entraînement des matériaux mobilisables.

L'approche anglo-saxonne: transport solide total et partiel

➤ «washload» ce type de transport qui s'effectue sur les particules les plus fines des matériaux constituant le lit. Il s'opère à travers de mécanismes comme le charriage ou la suspension.

➤ «bed material load» ce transport se réalise sur la totalité de matériaux du lit et il peut s'effectuer par charriage ou par charriage/suspension.

En conclusion, les transports solides dans les écoulements torrentiels sont conditionnés par la disponibilité des matériaux qui ont été détachés des versants au préalable. C'est aussi la taille et la capacité de transport des écoulements qui vont intervenir dans la mobilisation de ces matériaux. Ainsi, on peut considérer que l'érosion sera superficielle ou non dans la mesure où la disponibilité des matériaux est supérieur à la capacité de transport. L'érosion sera au contraire incisive avec une attaque du lit si la capacité de transport atteint puis dépasse la disponibilité en matériaux dans le lit. Enfin, si la capacité de transport est très supérieure à la disponibilité, il peut y avoir dépavage, c'est à dire, destruction du fond du lit. Ceci se produit lorsque le débit critique d'entraînement des plus gros matériaux du lit est atteint.

Tableau I.4

Récapitulatif des mécanismes érosifs du lit selon la disponibilité des sédiments.
(d'après Errezarret, 1996)

① si disponibilité des sédiments > à la capacité de transport →	dépôt
② si disponibilité des sédiments < à la capacité de transport →	érosion
③ si disponibilité des sédiments << à la capacité de transport →	dépavage

1.2.4 La modélisation, outils d'étude du transport solide.

La modélisation du transport solide du tri granulométrique a fait l'objet de nombreux travaux basés aussi bien sur des mesures en grandeur nature que sur des données acquises en laboratoire sur modèles réduits soutenant parfois des approches plus théoriques. Cependant, il convient de constater que de manière générale, la modélisation utilisée repose généralement sur des relations empiriques et souvent même sur des relations établies par régression multiples réalisées après avoir dégagé quelques paramètres (Errezarret, 1996). Ce constat n'est pas très surprenant pour plusieurs raisons et en particulier à cause de la grande diversité des mécanismes physiques impliqués dans les écoulements liquides et solides en milieu torrentiel

ainsi que de la grande diversité des propriétés rhéologiques du mélange solide/liquide selon la minéralogie, la granulométrie et le rapport Qs/Ql. Par ailleurs, le caractère très irrégulier voire imprévisible des écoulements torrentiels sont une gêne pour l'acquisition des données sur le transport solide ce qui limite par conséquence les bases de la modélisation.

Cette modélisation concerne le transport solide mais aussi de façon moins fréquente le tri granulométrique.

Modélisation de l'entraînement des solides

Le début de l'entraînement des solides, est étroitement lié aux contraintes de cisaillement critique exprimée par le Diagramme de Shields, (1936). Mais ce diagramme présente certaines limitations en condition de fortes pentes et sédiments grossiers, typique dans l'hydraulique torrentielle (Bathurst *et al.*, 1987). Ainsi, d'autres auteurs comme Ashida et Bayazit, (1973) ou Graff, (1989) ont proposé une expression de la contrainte de cisaillement critique en fonction de la profondeur de l'écoulement, de la rugosité et de la pente.

Une autre approche, semi-empirique, beaucoup plus adaptée aux écoulements en fortes pentes et faibles profondeurs a été adoptée. Elle est basée sur une équation de résistance de l'écoulement du type Manning-Strickler permettant l'expression du débit unitaire critique d'entraînement. La formule est établie par Bathurst *et al.*, (1983) pour des sédiments uniformes, en régime permanent et des pentes allant de 0.25 à 25 % :

$$q_{cr} = 0.15 g^{0.5} D_{50}^{1.5} I^{-1.12} \quad (I.1)$$

avec:

q_{cr} : débit critique unitaire (m³/s/m) D_{50} (ou D_m) : diamètre moyen des sédiments (m)
 g : accélération de la pesanteur = 9.81 I : pente (%).

Cette relation présente l'avantage d'intégrer la taille moyenne des grains et donc d'intégrer indirectement la granulométrie. Ainsi, avec cette formulation, l'augmentation du débit, et donc du débit critique unitaire, entraîne une modification de la granulométrie au profit des fractions au profit des fractions grossières, à condition bien sur qu'elles soient disponibles dans le lit, ce qui n'est pas toujours le cas.

Modélisation du transport par charriage avec de l'eau claire

La difficulté de la mesure du transport solide en milieu torrentiel a été souligné précédemment. En revanche, le nombre restreint d'études réalisées contraste avec le nombre de modèles proposés. Errezarret, (1996) a répertorié les modélisations existantes (Tableau I.5).

Ces équations ont été établies pour des situations assez diverses et nécessitent par ailleurs la vérification d'un certain nombre de conditions qui sont celles qui ont présidé à leur obtention. Ainsi, la relation proposée par Lefort, (1991) suppose une proportion largeur de la section et hauteur de l'eau de 18.

Modélisation du transport par charriage avec de l'eau concentrée

Les travaux portant sur la modélisation du transport par charriage avec de l'eau fortement chargée en solides sont nettement moins nombreux que dans le cas du transport dans de l'eau claire.

Ce type d'écoulement a été cependant étudié par Rickenmann, (1990, 1991) permettant ainsi de quantifier l'effet de la présence de sédiments fins sur le transport solide. L'effet des matériaux fins est différent suivant que le régime hydraulique est turbulent dans sa totalité ou au contraire turbulent lisse.

Dans le premier cas, le transport solide par charriage croît beaucoup avec l'augmentation de la densité du mélange. Pour le deuxième cas, le transport solide décroît avec l'augmentation de la concentration (ou l'augmentation des effets visqueux). En effet, au delà du nombre de Reynolds du grain $Re^* = 10$, ce qui correspond à une concentration volumique de 15 à 20 % d'après les essais de Rickenmann, il y a décroissance du transport solide.

Tableau I.5:
Récapitulatif de quelques méthodes d'estimation du transport solide par charriage
(d'après Errezarret, 1996)

Auteur	Equation	Conditions d'obtention
Meyer-Peter et Muller (1948)	$\Phi_B = 8 (\Theta - \Theta_c)^{1,5}$ $\Phi_B = \frac{q_B^{1/2}}{((s-1)gD_m^3)}$	$0.15 < B < 2 \text{ m}$ $0.01 < h < 1.2$ $0.4 < D < 30 \text{ mm}$ $0.04 \% < I < 2 \%$ $0.25 \cdot 10^4 < g \cdot (\sigma - \rho) < 3.2 \cdot 10^4$
Schoklitsch (1950)	$q_B = \frac{2,5}{\rho_s / \rho} I^{3/2} (q - q_{cr})$	$I < 9 \%$
Daido (1971)	$\Phi_B = 3.7 \cdot \Theta^{1.5} \left(1 - \frac{\Theta}{\Theta_c}\right)^{1.5}$	$I > 10 \%$
Smart et Jaeggi (1983)	$\Phi_B = 4 \cdot \left(\frac{D_{90}}{D_{50}}\right)^{0,2} \cdot I^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{8}{f}} \Theta_c^{1,5} (\Theta - \Theta_c)$	$2 < D_m < 10,5 \text{ mm}$ granulométrie étendue $0,13 < \Phi_B < 8,3$
Ward (1986)	$q_B = 7,16 \cdot D_{50}^{-0,25} \cdot \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0,2} \cdot I^2$	adimensionnel
Takahashi (1987)	$\Phi_B = \frac{1 + 5tg\beta}{\cos \beta} \sqrt{\frac{8}{f}} \Theta^{1,5} \left(1 - \frac{\alpha 2\Theta_c}{\Theta}\right) \left(1 - \alpha \sqrt{\frac{\Theta_c}{\Theta}}\right)$	$\alpha = f(I)$
Lefort (1991)	$\frac{Q_B}{Q} = 4,45 \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0,2} \frac{\rho}{\rho_s - \rho} I^{1,5} \left[1 - \left(\frac{Q_{cr}}{Q}\right)^{0,375}\right]$ <p>avec</p> $Q_{cr} = 0,12 \sqrt{g D_{50}^5 I^{-13/6}} (1 - 1,2I)^{8/3}$	$0,025\% < I < 20 \%$ $L/h = 8$

Liste des variables utilisées :

- Φ_B : paramètre adimensionnel de transport solide en charriage.
 Θ : paramètre adimensionnel de cisaillement. B : taux de bifurcation.
 Θ_c : contrainte adimensionnelle critique de cisaillement de Shields.
 q_B : débit solide en volume apparent par unité de largeur ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).
 q : débit liquide par unité de largeur ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).
 D_{90} : diamètres caractéristiques de la courbe granulométrique. : $d_i = f(\%)$ (m).
 D_m : diamètre moyen tel que $d_m = \sum d_i p_i$, avec $\sum p_i = 1$ (m).
 f : facteur de perte de charge de DARCY.
 $\tan \beta$: pente. α : coefficient fonction de la pente.
 Q : débit liquide (m^3/s). Q_B : débit solide (m^3/s).
 $(s-1)$: facteur de densité. s : densité du matériau.
 ρ_s : masse volumique du grain (T/m^3). ρ : masse volumique de l'eau (T/m^3).

Les résultats expérimentaux de Meyer-Peter, Smart et Jaeggi et quelques mesures de transport à forte pente permettent la formulation suivante :

$$q_B / q = 12.6 (D_{90} / D_{30})^{0.2} (\rho / (\rho_s - \rho)) I^2 (1 - q_{cr} / q) \quad (I.2)$$

Le débit de début d'entraînement (ou débit critique q_{cr}) est donné par :

$$q_{cr} = 0.065 ((\rho_s - \rho) / \rho)^{1.67} g^{0.5} D_{50}^{1.5} I^{-1.12} \quad (I.3)$$

Le champ d'application correspond à des pentes comprises entre 5 et 20 %, un débit liquide supérieur à 5 fois le débit critique et une hauteur relative h / D_{90} (h étant la hauteur d'eau en m) inférieure à 20.

De manière générale, il ressort que du fait de la diversité des mécanismes impliqués, de la diversité des situations (morphologie du torrent), de la forte variabilité du rapport débit solide/débit liquide, la modélisation est essentiellement empirique. Les apports de la physique concernent essentiellement la distinction des domaines de prédominance des différents comportements ou mécanismes, comme la distinction entre comportement newtonien et non-newtonien.

Conclusion sur la synthèse bibliographique

De cette étude bibliographique, il ressort que l'hydraulique torrentielle est moins étudiée que le domaine alluvial. Plus récentes et moins nombreuses, les études sont limitées par la difficulté d'obtention de données notamment à cause du caractère irrégulier voire imprévisible de ce type d'événements. De plus les transports d'eau et de M.E.S. dans les torrents sont régis par une grande diversité de phénomènes qui dépendent de la vitesse d'écoulement, de la granulométrie, du taux de M.E.S., autant de paramètres susceptibles de varier fortement dans le temps d'une crue et d'un bassin versant à l'autre.

Dans ces milieux les taux de M.E.S. peuvent atteindre des valeurs considérables puisque dans certains cas, des coulées de laves torrentielles peuvent être observées. Cependant, la plupart des cas correspondent à des écoulements concentrés ou hyperconcentrés, pour lesquels le mélange solide/liquide ne présente pas toujours un comportement newtonien.

Du fait de cette grande diversité de situations, la modélisation des transports de solides en milieu torrentiel est essentiellement empirique. Des relations ajustées sur plusieurs séries de mesures tentent de prédire le débit solide à partir du débit liquide et de paramètres tels que la pente du chenal, la granulométrie du matériaux, la morphologie de la section,.. Cependant, malgré ces propositions diverses, l'apport des approches purement physiques mérite d'être développé pour améliorer la modélisation.

L'évolution de la granulométrie elle-même est très complexe à prévoir car, selon le cas, un tri peut s'opérer, entraînant préférentiellement les particules fines, mais aussi un tri inverse pour lequel les éléments les plus grossiers sont situés à l'avant du flux, comme dans le cas des laves torrentielles.

Le traçage naturel qui permet notamment de quantifier les flux d'eau selon leur origine est plutôt utilisé en hydraulique fluviale alors que les préoccupations de l'hydraulique torrentielle sont encore centrées sur la mise en évidence des processus de transport. Les isotopes stables de l'eau et en premier lieu ^{18}O , sont des traceurs de l'eau particulièrement appréciés. Leur application est parfois contrariée par des problèmes de variabilité spatio-temporelle, en particulier pour le signal pluie. Cependant, il convient de posséder plusieurs traceurs indépendants pour ne pas avoir une vision trop simpliste de l'origine de l'eau. Le recours à d'autres traceurs est indispensables, mais beaucoup de composés chimiques des eaux naturelles sont impliqués dans des processus biogéochimiques qui modifient leur concentration et altère voire détruit l'information véhiculée par l'eau. Ainsi, avant d'utiliser un éléments

chimique comme traceur, il conviendra d'étudier au préalable son caractère conservatif. Cette vérification n'est que rarement abordée dans les études de traçage.

CHAPITRE II

LE MILIEU NATUREL ETUDIE: UN BASSIN VERSANT AUX FORTS CONTRASTES

Les études dans ce milieu montagnard tropical sont à l'heure actuelle peu développées. Le bassin versant de la rivière Boconó a fait l'objet de recherches hydrologiques par l'Université des Andes (Carrillo, 1985; Pérez, 1984; Velásquez, 1990) ainsi que par le Ministère de l'Environnement. Cependant, elles restent très ponctuelles. En général, il s'agit d'études sur des sous bassins localisés dans l'une ou l'autre des deux branches du Boconó et avec un pas de temps très lâche. L'information est fragmentaire, les données de base nécessaires pour ce travail n'existent donc pas pour ce bassin.

Les études géologiques sont peu précises pour des raisons d'échelle et les données chimiques sur l'eau, ou les ordres de grandeur des flux de matériaux transportés restent assez rares. Cette difficulté a dû être surmontée et a motivé une étude préalable de terrain.

Malgré la faiblesse des connaissances de base, les quelques travaux réalisés par les chercheurs universitaires sont précieux puisqu'ils nous ont permis de re-situer les crues étudiées dans leur contexte hydrologique.

En général les documents et les cartes consultés pour la végétation, les sols et plus particulièrement les cartes géologiques présentent de sérieux problèmes de fiabilité. Ceci peut être attribué au fait que les échelles de travail sont très différentes de celles retenues ici. Aussi, il a fallu fournir des efforts importants pour récupérer les informations et les recalculer par rapport à nos propres observations.

La description du milieu naturel présentée ci-dessous constitue une synthèse entre les données bibliographiques et les observations morphologiques, lithologiques et minéralogiques réalisées dans le cadre de ce travail.

2.1 Les Andes Vénézuéliennes:

Localisée à l'ouest du pays, la chaîne andine divise cette partie du Vénézuéla en deux grands sous bassins: le bassin pétrolier du lac de Maracaïbo au nord et le grand bassin fluvial de l'Orénoque au sud. Les Andes vénézuéliennes, avec une longueur voisine de 425 km et une largeur de 80 km, constituent la partie la plus septentrionale de la gigantesque chaîne montagneuse qui surmonte la côte pacifique de l'Amérique du sud.

2.1.1 Structure de la chaîne des Andes au Venezuela

Lorsque le système andin atteint la Colombie, il s'organise en deux branches: l'une d'elles; de direction NNW constituant la frontière Colombo-Vénézuélienne est connue sous le nom de «Sierra de Perijá» et l'autre, de direction NE forme les Andes Vénézuéliennes ou «Cordillera de Mérida». Les Andes vénézuéliennes commencent dans le Parámo Tamá (dépression du Táchira) par un ensemble de sommets qui s'élèvent jusqu'à 3 000 mètres. A partir de cette altitude, l'apparition d'un bassin d'effondrement, ayant comme centre le «Parámo de Mucuchíes», subdivise la chaîne andine en deux cordillères. Il est constitué par tout un système de failles longitudinales marqué par des vallées et des cols. Le premier ensemble septentrional atteint une altitude maximale de 4 762 m au Parámo Piedras Blancas, alors que la chaîne méridionale rassemble les principaux sommets et pics (Pic Bolívar culminant à 5 007 m) ainsi que les rivières les plus importantes de la cordillère andine. Le flanc auquel nous nous intéressons est celui du sud appelé aussi «Andino-Llanero» et plus particulièrement au bassin du Río Boconó dans la montagne de la Sierra Trujillo.

2.1.2. Morphologie et lithologie

Il existe deux types principaux de paysages dans les Andes vénézuéliennes selon l'altitude. Le premier type, localisé en zone glaciaire, se développe au-dessus de 4 000 mètres et un second type appartient à la zone périglaciaire, entre 2 700 et 4 000 mètres d'altitude.

La région glaciaire est très accidentée et présente dans ses parties les plus élevées des crêtes aux parois pentues ainsi que des cirques glaciaires. Dans sa partie moyenne, les vallées en forme de U constituent l'essentiel du paysage; les moraines et les lacs glaciaires se localisent au contact entre les zones glaciaires et périglaciaires.

Le secteur périglaciaire, bien représenté dans la zone étudiée est appelé «parámos». Il a été affecté par la dernière glaciation du Pléistocène. Les principaux éléments du paysage sont constitués par des arcs de moraines et des dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires. Il se caractérise par une végétation très particulière qui sera décrite ultérieurement.

La lithologie des Andes concerne des roches allant du précambrien, qui constituent le soubassement, jusqu'au tertiaire ainsi que d'importants dépôts quaternaires.

Cet ensemble a été modelé par deux principales orogénèses, (Pouyllau, 1989; Gonzalez de Juana *et al.*, (1980); la première date du paléozoïque et une autre plus importante de l'ère tertiaire. Cette dernière s'est produite en deux étapes: un soulèvement au paléocène-oligocène et une surrection finale qui débute au mio-pliocène et reste active de nos jours. Bien que peu de travaux aient montré l'incidence de cette activité sismique actuelle sur l'érosion, il semble que celle-ci soit la cause de réajustements du profil des rivières et de reprises de l'érosion dans la zone d'étude durant les années de forte activité sismique.

Pouyllau (1989), a résumé la structure précédemment décrite par une coupe de direction nord-sud qui illustre la diversité géologique caractéristique de cette partie du pays (Fig.I.1).

2.1.3. Le bassin versant du Río Boconó: exemple d'un bassin montagnard des Andes vénézuéliennes.

Dans l'ensemble régional des Andes, le bassin versant de la rivière Boconó est localisé au centre du bassin d'effondrement du «Páramo de Mucuchíes». Il est encadré par la ligne de partage des eaux des Andes au nord (Sierra de Trujillo) et la plaine des Llanos au sud. (Fig. II.2).

Il se situe entre les coordonnées 8° 54' et 9° 31' de latitude Nord et 70° 11' et 70° 04' de longitude Ouest (Fig. II.3), couvrant une superficie voisine de 1 540 km².

La structuration morphologique de la zone d'étude est conditionnée par sa position sur le versant des Andes: le bassin amont présente des vallées encaissées affectées par la présence de la faille de Boconó et des versants façonnés par les anciens glaciers. Le bassin moyen et l'aval sont caractérisés par une morphologie de piedmont.

Du point de vue hydrologique, les eaux qui traversent ce versant proviennent des zones de haute montagne. Ces écoulements montagnards cheminent jusqu'à la plaine Vénézuélienne où ils vont alimenter des rivières comme l'Apure et le Guanare. Ces dernières rivières se jettent dans l'Orénoque longue de 2 150 km, fleuve qui occupe la troisième place à l'échelle mondiale avec un débit moyen annuel de 1 135 Km³.an⁻¹ (Meybeck, 1995)

2.2. Géomorphologie et lithologie du bassin versant du Río Boconó.

2.2.1. Géomorphologie

De grandes unités contrastées par leur hydrologie et leur lithologie se distinguent à l'échelle du bassin versant. Une première opposition entre la haute montagne tropicale dans sa partie amont et la zone de contact montagne-plaine vers l'aval apparaît.

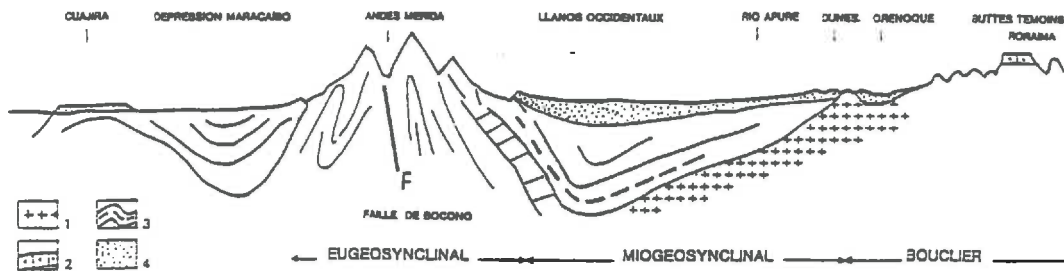


Figure II.1: Coupe schématique de la structure des Andes au niveau du bassin versant du Río Boconó (d'après Pouyllau, (1989).



Figure II.2: Image radar des Andes Vénézuéliennes au niveau du bassin versant du Río Boconó.

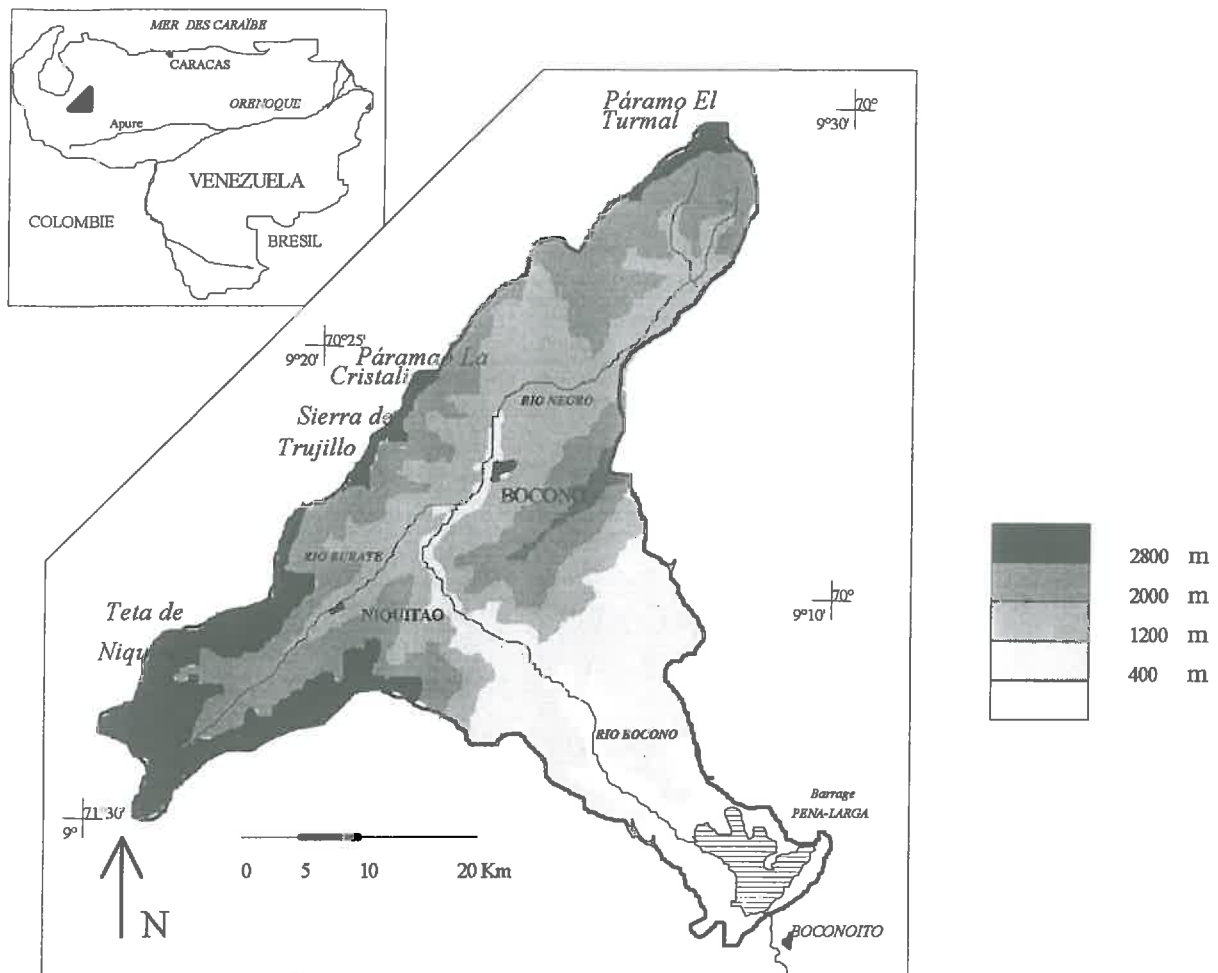


Figure II.3: localisation et morphologie du bassin versant du Río Boconó

Les altitudes maximales évoluent d'ouest en est depuis 4000 mètres à la «Teta de Niquitao» passant les 2900 m au «Páramo la Cristalina» pour remonter ensuite jusqu'à 3 400 m au «Páramo el Turmal».

La zone de la faille de Boconó est occupée par les deux rivières principales, Boconó et Burate qui constituent les vallées d'altitude. Cependant, au nord de celle-ci et à partir de la confluence des deux rivières Burate-Boconó, la faille subit une dérive vers le sud. Cette nouvelle direction peut s'expliquer par un autre contrôle tectonique qui apparaît au niveau de sous bassin San Miguel. Le parcours de la rivière Boconó change de direction et son écoulement dévié par cette nouvelle fracture devient moins rectiligne, ce qui lui permet de construire des zones de dépôts sous forme de vallées alluviales.

Au sud de la faille, s'étend le massif de Guaramacal, chaîne montagneuse située entre l'amont montagnard du bassin versant et l'entrée progressive du Boconó dans le piedmont sud-oriental des Andes Vénézuéliennes. La rivière Boconó a entaillé une vallée très encaissée sur une trajectoire d'environ 45 Km pour atteindre le barrage de «Peña Larga». Ce dernier constitue l'exutoire de la zone d'étude. Dans cette unité du Guaramacal, il existe localement des dénivelés considérables qui peuvent atteindre 2 200 mètres en 7,5 Km.

Enfin, d'après Pouyllau (1989), un dernier ensemble structural se situe au contact montagne-plaine; il est souligné par la faille de Canagua, grossièrement parallèle à la faille de Boconó et contrôle ainsi l'arrivée de la rivière dans la plaine.

2.2.2. Lithologie

Une bonne connaissance de la lithologie du bassin est importante car elle permet, entre autres, d'identifier les matériaux sensibles à l'érosion. Ce paragraphe s'attachera aussi à rechercher d'éventuelles singularités minéralogiques susceptibles d'être utilisées comme marqueur des M.E.S.

De manière générale, l'organisation structurale imposée par la faille de Boconó induit une opposition lithologique nord-sud. Le secteur nord est généralement composé de roches cristallines et plus particulièrement de gneiss, granites et schistes micacés, alors que le sud est caractérisé par des roches affectées par un bas métamorphisme ainsi que des faciès sédimentaires (Fig. II.4).

Carte pétrographique schématique du bassin versant

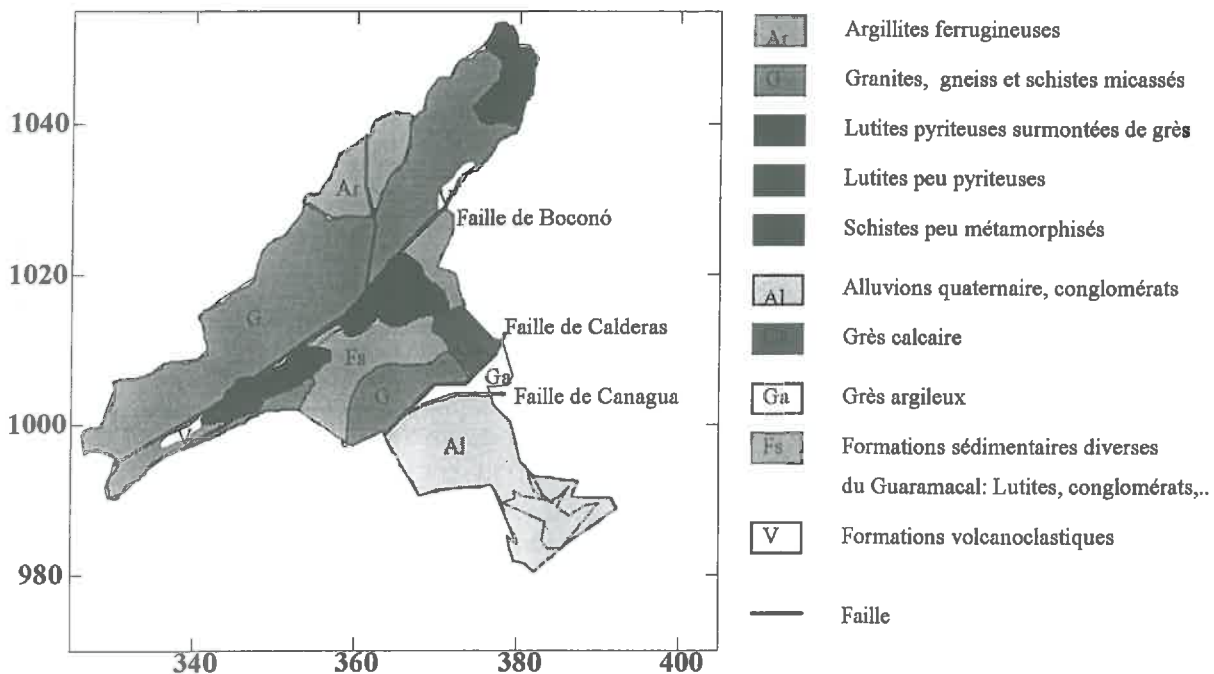


Figure II.4: Carte lithologique simplifiée du bassin versant de la rivière Boconó.

2.2.2.1. Burate

Dans le bassin versant du Burate cette opposition nord-sud apparaît plus évidente. Le versant nord est constitué de roches cristallines, essentiellement de gneiss schisteux, de granites, de schistes micacés et de schistes chloriteux. Les périodes glaciaires ont laissé quelques lacs en altitude ainsi que des moraines et des vallées en forme de U. Pour le haut Burate la lithologie du versant sud est la même que sur le versant nord.

Plus en aval, la campagne de terrain a permis de révéler l'existence de formations volcaniques sur le secteur situé entre Quebrada Escurufini et Quebrada El Molino. La détermination pétrologique des diverses roches volcaniques a été réalisée par le laboratoire de géochimie de l'Université de Zaragoza (Planche I).

Dans ce type de matériaux volcanoclastiques, l'étude minéralogique réalisée sur lames minces montre des amphiboles et des quartz en bon état de conservation, ce qui suggère un faible degré d'altération. La résistance des amphiboles à l'altération s'explique par les températures fraîches des zones de montagne et par une érosion intense qui ramène en surface des matériaux peu météorisés. Les observations de terrain indiquent que les dépôts s'accumulent sous forme de cônes de déjection de grande extension ce qui montre la forte sensibilité de ces roches à l'érosion.

Il existe aussi dans ce même secteur, une série de roches sédimentaires essentiellement composées d'ardoises sériciteuses, de lutites, de grès et de grauwackes feldspathiques constitués de fragments de projections volcaniques.

La zone localisée au centre du bassin versant est occupée par une formation charbonneuse avec de fortes teneurs en sulfure. Des grès blancs surmontent habituellement ces brèches charbonneuses et s'insinuent dans leur partie supérieure. Par altération, ces grès donnent des sables peu cohérents qui sont très sensibles à l'érosion. Le secteur présentant les brèches charbonneuses surmontées de grès blancs s'étend depuis les environs de Niquitao jusqu'à la hauteur de la ville de Boconó (sous bassin de la quebrada la Segovia) mais aussi dans la périphérie de la zone d'étude. Sur ce secteur des marques impressionnantes d'érosion, sous forme de ravins, font l'objet de tentatives de stabilisation.

La rivière Burate durant sa trajectoire ne construit pas de niveaux de terrasses en raison de son régime hydrique vigoureux. Cependant, il peut présenter quelques vallées d'importance limitée comme c'est le cas de celle située à la confluence Boconó- Burate. Par ailleurs, une vallée alluviale fossile élevée par rapport au cours actuel du Burate a été observée aux environs de Las Mesitas. Cependant, cette vallée ne semble pas apte à emmagasiner une grande nappe alluviale.

2.2.2.2. Boconó

Dans le bassin de Boconó, contrairement à celui de Burate, le contraste nord-sud imposé par la faille de Boconó est moins marqué. Ceci est lié à la faille oblique, de direction nord-est, qui provoque un changement de trajectoire de la rivière Boconó et sur laquelle se localise le sous bassin San Miguel. Dans ce secteur, la lithologie est différente du reste de la zone d'étude; elle présente des séquences de roches argileuses d'un bas degré de métamorphisme et avec une forte teneur en oxydes de fer (argilites ferrugineuses rouges ou oranges) et des restes de biotites dont l'observation en lame mince montre qu'elles sont désagrégées.

A l'amont de la rivière Boconó, se trouve une série de roches sédimentaires faiblement métamorphisée, composée d'ardoises schisteuses, de grauwackes feldspathiques, de lutites et d'amphiboles à grain fin. Dans le secteur du haut Boconó ou Río Negro, la séquence volcanoclastique décrite pour le Burate réapparaît avec des caractéristiques et des conditions comparables à celles du Burate, mais déplacées plus au nord. Dans cette partie du bassin, la rivière construit à deux reprises des petites vallées alluviales avec des dépôts, la première au niveau du haut Boconó ou Río Negro, la deuxième à partir du secteur quebrada San Miguel dont la vallée plus large se prolonge jusqu'à la confluence Boconó-Burate. Il existe de formes d'érosion spécifiques à cette lithologie, comme les coulées de boues ou les glissements de terrain.

Il semble important de noter que dans le secteur amont du Boconó les deux vallées orientées vers l'est (Río Azul et Negro) sont ouvertes, peu pentues et constituées de matériaux argileux provenant de l'altération de schistes ardoisiers. Ces vallées peu entaillées par la rivière abritent une nappe aux propriétés fortement réductrices. A leur niveau, le fond du cours d'eau constitué de galets, est tapissé d'un voile de fer ferrique trahissant une contribution notable de la nappe.

Mis à part ce secteur du sous bassin San Miguel et du Río Negro qui couvrent une grande surface, le secteur au nord de la faille appelé «Sierra de Trujillo», est constitué essentiellement de roches cristallines de type gneiss, de pegmatites, de schistes siliceux, micacés et feldspathiques.

2.2.2.3 Guaramacal

Le massif de Guaramacal culmine à 3 100 m; pour des raisons d'accessibilité des observations pétrographiques n'ont pas été réalisées sur cet ensemble morphologique avec la

même finesse que sur les zones amont. En effet, ce massif est profondément entaillé par le Río Boconó. Les versants sont très abrupts rendant très difficile l'accès à la rivière.

D'après Reaud (1989), ce secteur de composition hétérogène comporte des ardoises, des quartzites, des grès calcaires et des lutites du paléozoïque ainsi que des roches datant du crétacé et du tertiaire.

Une dénivelée moyenne de 2 700 m en 28 km sépare la ligne de crête du Guaramacal de l'exutoire, ce qui constitue une forte pente et favorise l'érosion.

A l'exutoire, les dépôts (quelques terrasses) quaternaires et les collines constituent les principaux éléments du paysage.

2.3 Climatologie et couverture du sol

Ce paragraphe vise essentiellement à caractériser le régime des précipitations sur le bassin, aussi bien en terme de volume annuel, que de variation spatiale ou d'étude de fréquence. La couverture végétale naturelle ou d'origine anthropique qui protège le sol des averses sera également décrite succinctement.

2.3.1. Climatologie

Le bassin versant du Boconó est orienté vers la plaine vénézuélienne des Llanos. Il est soumis de ce fait au régime pluviométrique de cette vaste région: une saison sèche de novembre à mars, alterne avec une saison des pluies dont le maximum de précipitations se situe en juin-juillet.

Dans l'ensemble du bassin les masses d'air humide liées à la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) proviennent du bassin de l'Orénoque situé au sud; les nuages remontent vers le nord en se déchargeant progressivement de leur eau. Ainsi, les précipitations diminuent progressivement avec l'altitude et les conditions climatiques de l'aval du bassin, chaudes et humides s'opposent à celles froides et sèches, de la haute montagne.

Plus en altitude, dans les vallées de montagne les précipitations se distribuent de manière inégale. (Fig. II.5) Les isohyètes montrent que la branche Boconó est la plus arrosée, car le déplacement des masses d'air se produit là où les contrôles orographiques sont moins rigoureux. C'est dans les stations Campo Elías avec 2 500 mm et à Mosquey 1 700 mm, localisées sur ce secteur, que s'enregistrent les plus importantes valeurs de précipitations. En revanche, les stations du bassin de Burate et leur zone d'influence, Las Mesitas et le Páramo la Cristalina présentent des précipitations moins abondantes. Il faut remarquer que c'est dans cette partie du bassin que se localisent aussi les plus importants sommets.

Le réseau météorologique est constitué de 10 stations (Fig. II.6). Il est bien distribué à l'amont, où 8 stations mesurent température, précipitation, évapotranspiration et radiation solaire depuis 25 ans. En revanche, pour la partie aval, le massif de Guaramacal et le barrage, seules deux stations de mesures existent. C'est cet ensemble de stations qui servira de base à l'étude isotopique du signal de la pluie (Chapitre IV)

Dans la partie amont les conditions climatiques sont très influencées par le relief. Les températures (12 °C de moyenne) diminuent avec l'altitude avec une moyenne de 0,6°C par 100 mètres; à partir de 2 000 m des gelées sporadiques apparaissent tandis que les précipitations deviennent peu abondantes (972 mm à Boconó-ville, 922 mm à las Mesitas et 985 mm au Páramo la Cristalina). La sécheresse qui débute en général en novembre persiste jusqu'au février. Elle dure de 3 à 4 mois selon la localisation. En revanche, la saison pluvieuse compte de six à sept mois humides. (Fig. II.7)

Pour le secteur situé entre le massif de Guaramacal et l'exutoire du bassin, les précipitations augmentent. La hauteur des précipitations peut atteindre jusqu'à 1 500 mm pour la station «Peña Larga» située à la limite montagne-plaine. La saison sèche est plus marquée tandis que les mois pluvieux sont supérieurs à six. La température moyenne annuelle est de 25°C accompagnée d'une forte évaporation.

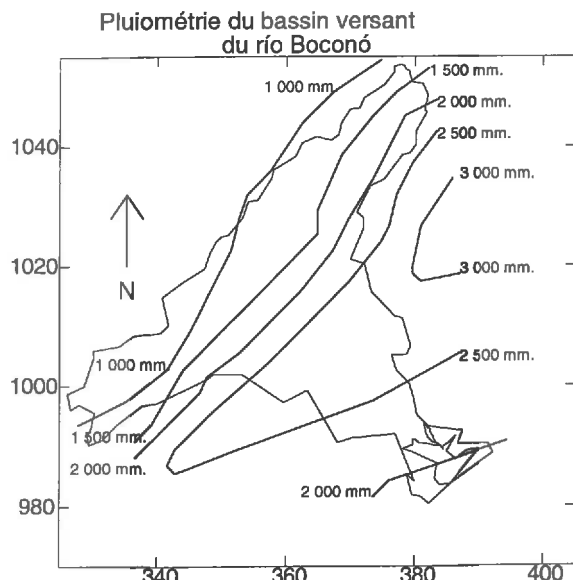


Figure II.5: Répartition de la pluie dans le bassin versant du Río Boconó (d'après Velásquez, 1985).

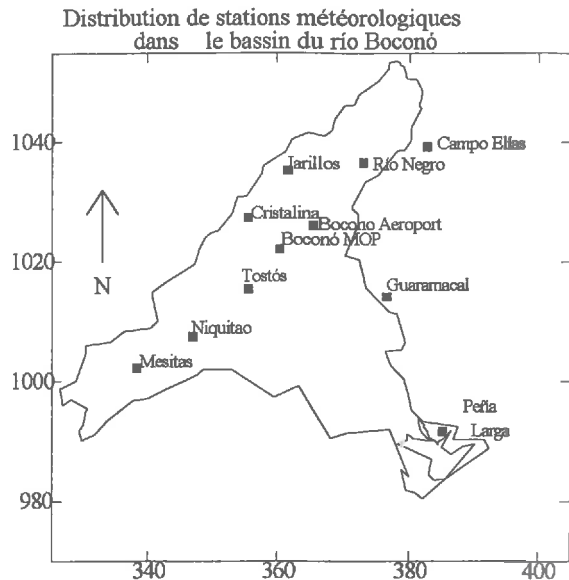


Figure II.6: Localisation des différentes stations météorologiques dans le bassin versant du Río Boconó.

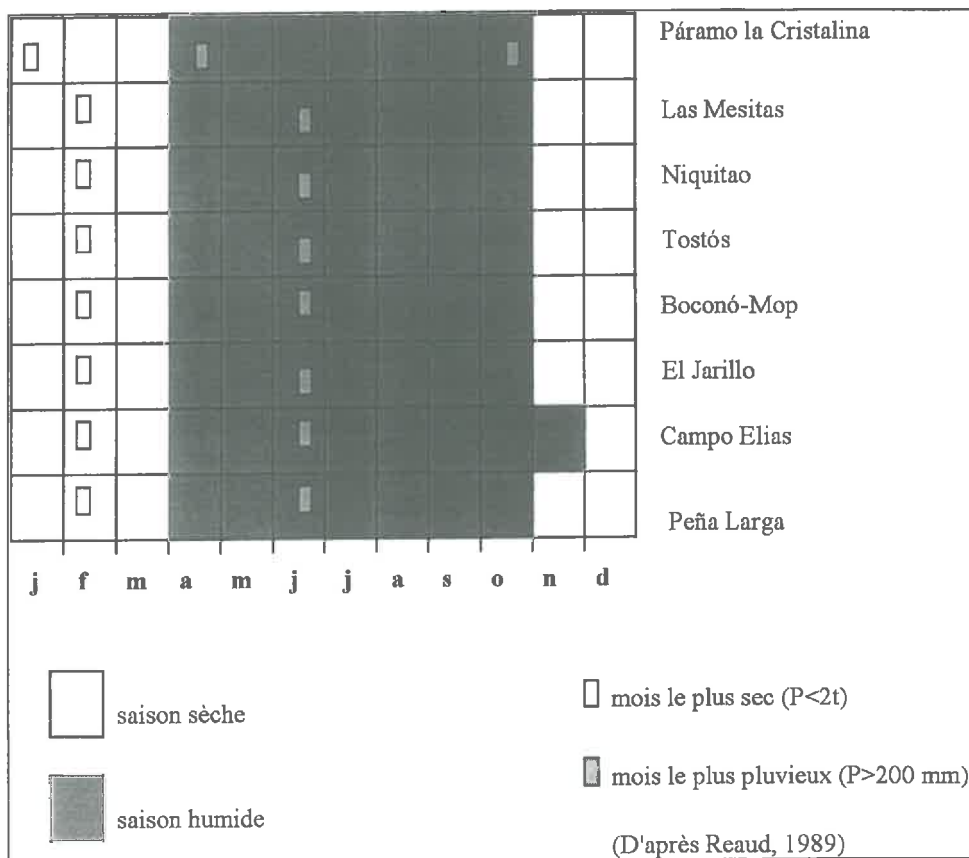


Figure II.7: Répartition de la saison sèche et de la saison humide pour l'ensemble du bassin versant du Boconó.

2.3.2. Couverture et occupation du sol

L'étude de la répartition de la couverture végétale et des zones cultivées est importante car elle détermine la protection ou l'exposition des sols à l'érosion. De plus la

connaissance des associations végétales peut s'avérer utile pour une étude du carbone particulaire véhiculé par le réseau hydrographique.

2.3.2.1. Couverture Végétale

Le bassin versant a fait l'objet d'une étude approfondie sur la couverture végétale (Reaud, 1989) qui servira de base à ce paragraphe.

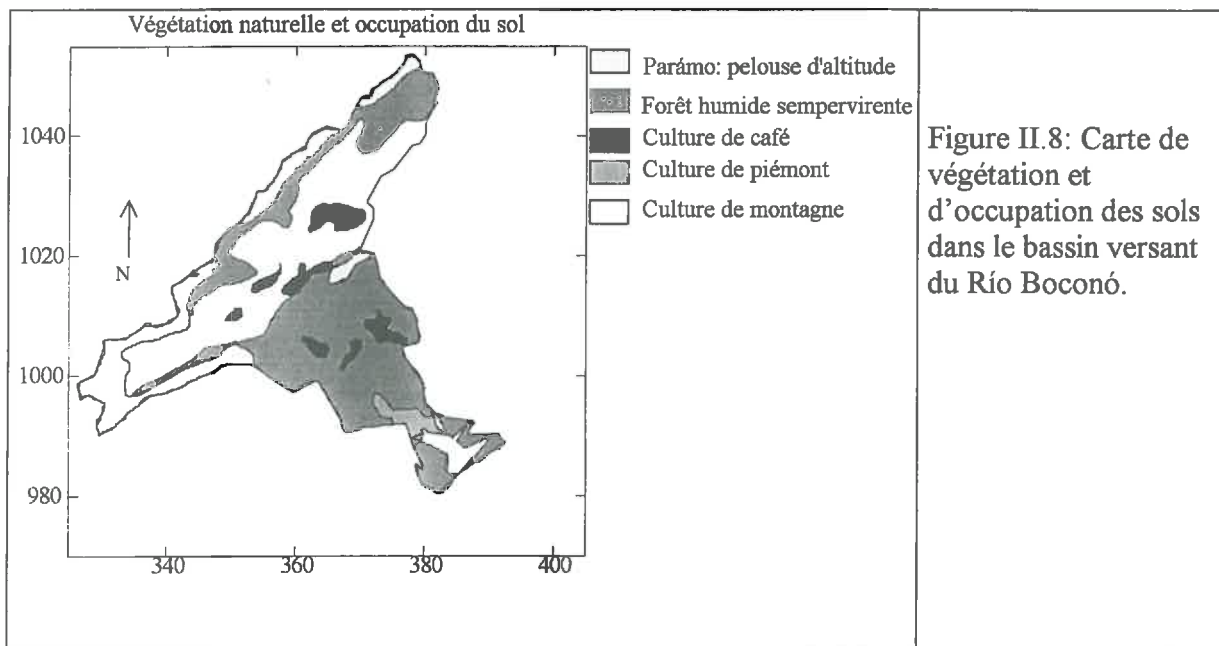
La couverture végétale présente dans la zone d'étude est principalement le résultat des variations climatiques, liées à l'altitude et au mouvement des masses nuageuses (Fig. II.8). Les conditions édaphiques n'interviennent que localement lorsqu'elles imposent des contraintes sévères.

En suivant le mouvement des précipitations, qui remontent de la plaine la première formation végétale rencontrée est la forêt humide sempervirente de basse altitude. Elle se localise sur les zones chaudes et humides entourant l'exutoire. Il s'agit d'une forêt dense qui protège efficacement la surface du sol des averses tropicales violentes. Parmi les arbres composant cette forêt, apparaissent le *Couroupita guinensis* (muco) le *Cedrela fissilis* (cedro amargo) et le *Ochroma pyramidale* (balsa).

Avec l'altitude, le versant sud se couvre d'une forêt très humide de basse montagne, puis de montagne jusqu'à 2 700 mètres. Jusqu'à des altitudes de 1 500 mètres cette forêt subit des déboisements souvent illégaux susceptibles d'affecter sa capacité à protéger le sol.

Au delà de 2 700 m. les hauts sommets du Guaramacal sont le domaine du «páramo», végétation steppique d'altitude caractérisée par des espèces adaptées au froid, telle que diverses espèces de *Espeletia* (frailejon), dont les feuilles duveteuses protègent la plante du froid et de la sécheresse.

Dans les vallées de Burate et de Boconó, le gradient pluviométrique du sud vers le nord induit une opposition de versant. Le flanc nord de Guaramacal est occupé par une forêt sempervirente avec des espèces endémiques comme la *Creecopia sp.* (yagrumo de hojas blancas), alors que le versant opposé est essentiellement couvert d'une végétation rase de páramo.



L'effet de la sécheresse sur la végétation de la partie nord du bassin est différent à l'est et à l'ouest. Sur le Burate, le versant nord est couvert de végétation typique de páramo. En revanche, pour le Boconó, certains secteurs comme la haute vallée de San Miguel sont

dénudés du fait de l'aridité importante. Ceci concerne principalement la partie centrale de la bordure nord du bassin. Les sols alors non protégés, se développant sur des argilites ferrugineuses, sont particulièrement sensibles à l'érosion.

Du point de vue, lithologique seuls les sols acides induisent une spécificité dans l'ensemble décrit antérieurement (Cornieles et Vallés, 1995). L'acidité se traduit par une zonation de la végétation en auréoles concentriques de taille kilométrique:

- au centre de ces auréoles se trouvent des zones hyper-acides. Le sol est presque nu; deux à trois espèces végétales seulement peuvent être observées (fougères, quelques graminées très spécialisées et des orchidées éparses). L'agriculture est impossible. L'absence de végétation liée à l'acidité conduit à une accélération de l'érosion et les conséquences en aval sont importantes;

- en bordure de cette zone hyper-acide, le sol est plus couvert, seuls quelques arbustes survivent. Les cultures (bananier, canne à sucre, caféier) sont rachitiques et présentent des signes évidents de toxicité (jaunissement, dépérissement,..);

- finalement, les sols de la zone périphérique présentent une couverture végétale (généralement forêt) ou sont utilisés par des cultures de maïs. Dans tous les cas, les végétaux sont affectés par l'acidité en terme de croissance, mais de façon plus discrète que dans les zones plus acides.

2.3.2.2. Occupation du sol par l'agriculture

La répartition des cultures a été déduite de l'interprétation d'une image satellite (Landsat TM 4,5,6 de Janvier 1988) ainsi que des documents bibliographiques existants. (Fig. II.8)

Les vallées de montagne sont les principales zones soumises à l'activité agricole. Elles sont situées entre 1 800 et 2 800 m; ceci est valable pour les deux branches du bassin. La préparation du sol se réalise au début de la période de pluies, pour le semis des haricots noirs et du maïs. Des cultures de carottes, choux, betteraves, salades et oignons sont pratiquées de façon plus intensive.

Sur des sols sableux acides, mais pas hyper-acides, aux environs de la ville de Boconó, les cultures de fraises, tolérant ce type de pH, présentent une certaine extension.

Les conditions écologiques très variées permettent plusieurs types de cultures telles que les bananiers, les haricots noirs, la canne à sucre, le maïs et le manioc. C'est à ce niveau, notamment dans la vallée du Boconó, que se localisent les principales exploitations de café. Ces dernières s'accompagnent de défrichement du sous-bois, ce qui a des conséquences néfastes sur l'érosion.

2.4 Le réseau hydrologique

Le bassin versant du Boconó est organisé au nord en deux grandes branches:

- le sous bassin de Boconó ou Río Negro au nord-est;
- le sous bassin de Burate au nord-ouest.

Ces deux sous bassins sont bien différenciés et dissymétriques. Le versant nord est plus étendu que le versant sud moins large.

Le Burate suit une trajectoire rectiligne ce qui lui donne une pente plus marquée. Par contre, la rivière Boconó présente un parcours plus sinueux. Ces deux cours d'eau se rejoignent au centre de la partie montagnarde du bassin à une altitude de 1 150 mètres.

Après cette confluence, la rivière du Boconó traverse le massif de Guaramacal et reçoit alors les apports provenant de celui-ci. Elle débouche ensuite dans le barrage «Peña Larga».

2.4.1 Hypsométrie comparée des différentes branches et affluents.

Les profils de pente du cours des principaux torrents et rivières montrent une diversité de leur trajectoire et de leur morphologie.

La trajectoire du Boconó, depuis sa partie amont jusqu'à la confluence, présente des ruptures de pentes qui séparent des zones de vallées alluviales, pouvant constituer des secteurs de dépôts d'alluvions. Après sa confluence avec le Burate, la rivière doit traverser le massif du Guaramacal vers l'exutoire avec une reprise des fortes pentes. (Fig. II.9)

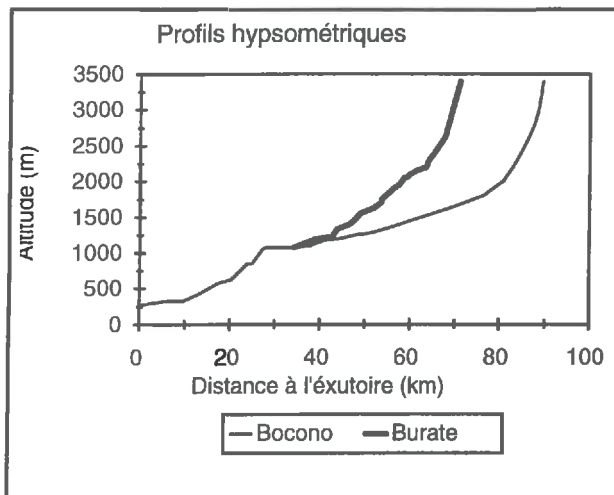


Figure II.9: Profils hypsométriques de la rivière Boconó jusqu'à l'exutoire.

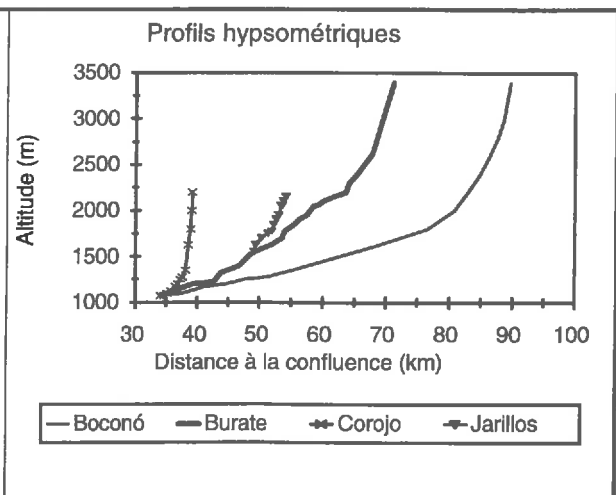


Figure II.10: Profils hypsométriques du Boconó et des principaux torrents étudiés.

Le lit du Burate est plus accidenté et sa pente moyenne plus forte encore que celle du Boconó. Ceci suggère un régime plus torrentiel. Contrairement au Boconó, il n'existe pas de zone de dépôt alluvial actuellement active.

En terme de pente, le cours du Boconó présente une pente de 1,7% depuis la confluence avec le Burate jusqu'à 42,4 km à l'amont de ce point. Sur ce trajet, le Boconó peut être classé comme une rivière torrentielle (Errezarret, 1996). Entre 48,8 et 55,5 km à l'amont de la confluence, la pente atteint 17,9%, ce qui place cette partie du cours dans la classe des torrents.

Pour le Burate, la pente est de 3,2% entre sa confluence avec le Boconó et 19,5 km à l'amont de ce point, ce qui en fait un torrent jusqu'à son exutoire (Fig. II.10). Entre 19,5 et 30 km de la confluence, la pente est de 5,7%. Entre 33,7 et 37 km la pente atteint 23,5%. Ainsi, le caractère torrentiel est très marqué sur le Burate jusqu'à son exutoire, alors que la régimes est plutôt celui d'une rivière torrentielle sur les 40 derniers kilomètres de son cours. Ces chiffres illustrent de façon spectaculaire la différence de profil entre les deux branches principales de la partie montagnarde du bassin versant du Río Boconó.

Enfin, les cours d'eau Corojó et Jarillos ressemblent, en terme de pente, à la partie amont des deux bassins principaux (Fig. II.10).

Ainsi, dans la partie amont, le trajet des eaux comporte deux étapes:

- Les flancs des bassins du Burate et du Boconó, sillonnés de nombreux torrents très pentus, illustrés par Corojó et Jarillos, reçoivent la pluie et la concentrent vers les torrents. La partie amont des deux rivières présente des pentes comparables.
- les axes drainant principaux constitués par le Burate et le Boconó ont des pentes moins marquées que les torrents et collectent les eaux déversées par ces derniers.

L'hypsométrie des zones réceptrices montre que l'altitude moyenne du sous bassin de la rivière Boconó se situe aux environs de 1 900 mètres alors que pour le Burate, elle atteint 2600 mètres. L'allure des courbes hypsométriques montre bien l'opposition de ces deux bassins. Pour le Boconó, la forte pente de la courbe hypsométrique à faibles altitudes correspond une vallée alluviale, alors que le Burate présente au long de son parcours une vallée très encaissée.

Le bassin du Burate peut être considéré comme typique de la haute montagne andine avec plus du 60% des surfaces localisées entre 2 400 et 4 000 mètres d'altitude (Fig. II.10). En revanche, le bassin du Boconó présente une distribution bimodale des surfaces dont 80% se situent entre 1 000 et 2 400 mètres d'altitude (Fig. II.11).

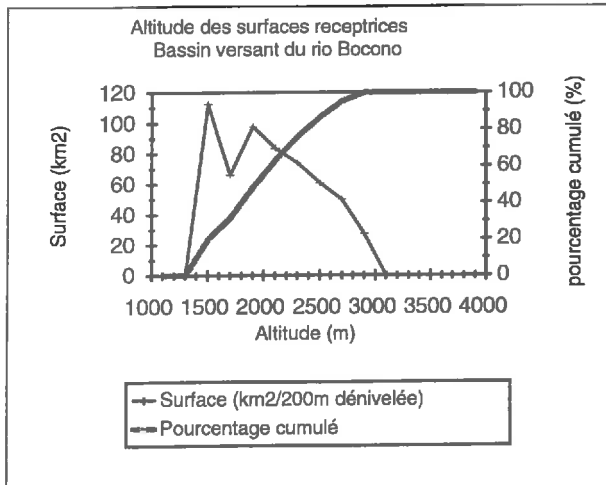


Figure II.11: Profil de surface réceptrices dans la rivière Boconó.

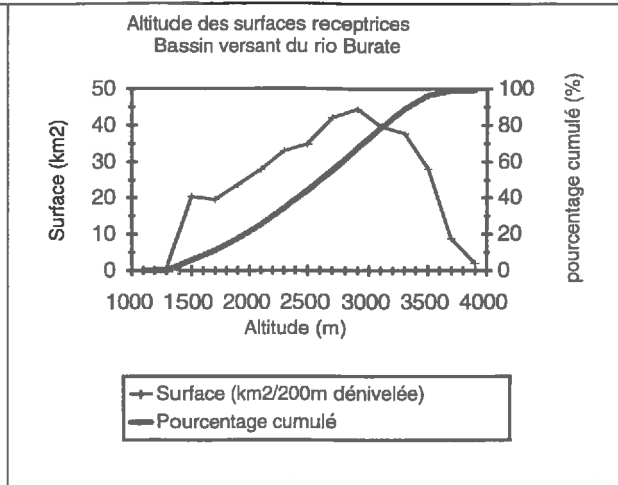


Figure II.12: Profil de surface réceptrices dans la rivière Burate.

2.4.2 Le sous bassin de Boconó avant la confluence:

Le sous bassin de Boconó dans sa partie amont, entre 1 100 et 3 000 mètres, couvre une surface voisine de 574 km² jusqu'à sa confluence avec le Burate. Son réseau de drainage assez complexe montre une densité d'environ 6 m.ha⁻¹ et une forme de drainage dendritique (M.A.R.N.R.,1991) (Fig. II.13). Les affluents se raccordent à l'axe principal sans former d'angle droit, sauf dans la partie supérieure de Páramos où confluent les Ríos Negro-Azul-Blanco. Quelques kilomètres après cette confluence, la vallée du Boconó s'élargit. Les dépôts alluviaux accumulés dans cette zone sont susceptibles d'emmagasiner une nappe alluviale durant certaines périodes de l'année.

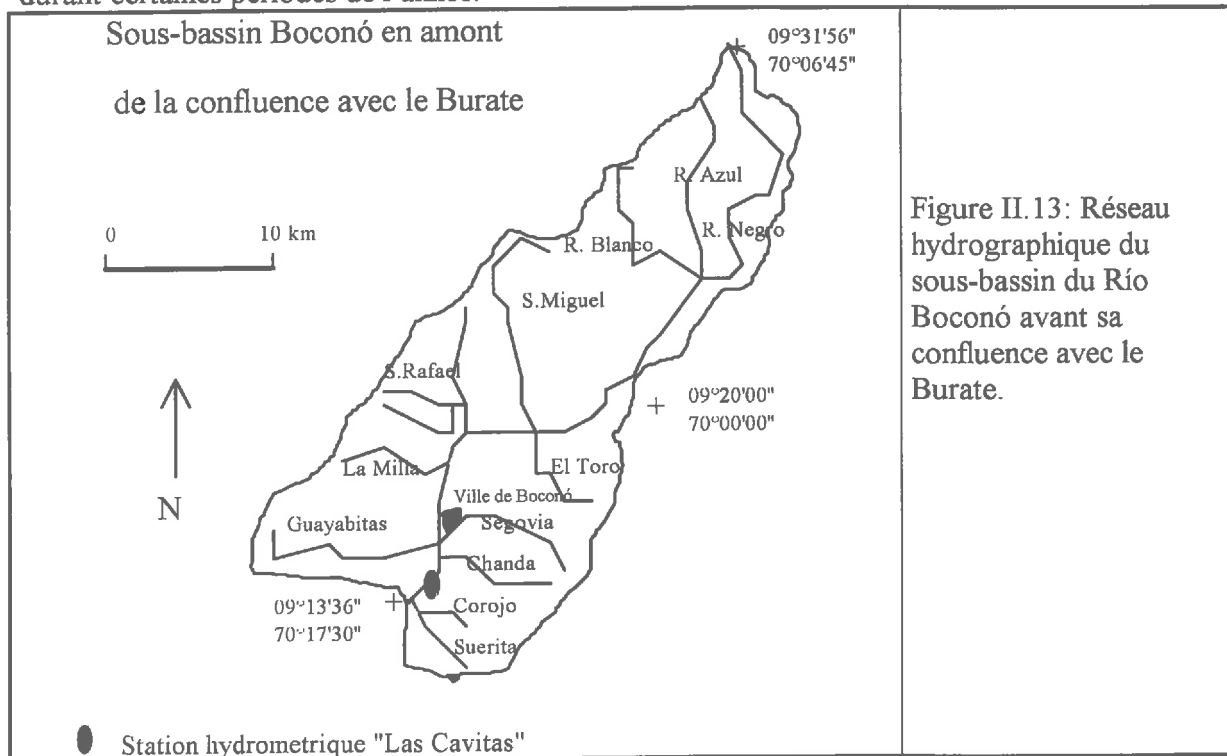


Figure II.13: Réseau hydrographique du sous-bassin du Río Boconó avant sa confluence avec le Burate.

La rivière retrouve ensuite une vallée encaissée jusqu'au secteur San Miguel. A cet endroit le Boconó, reçoit deux importants affluents (Quebrada San Miguel et San Rafael) changeant ainsi sa dynamique d'écoulement, il devient plus large et sinueux jusqu'à la confluence avec le Burate. Entre la confluence avec la quebrada San Miguel et la ville de Boconó, une vallée alluviale constituée de blocs, pierres et sables grossiers est susceptible d'emmagasiner une nappe alluviale à réaction rapide avec la rivière. A l'opposé, sur le versant sud, il faut remarquer les courtes distances parcourues par les affluents qui se caractérisent par des trajectoires plus rectilignes.

Les divers affluents du Boconó débouchent de manière régulière tout au long de l'axe principal, à des intervalles plus ou moins réguliers.

Les données hydrologiques pour l'ensemble du bassin, ne sont pas aussi abondantes que les données météorologiques. En effet, il n'existe qu'une seule station de jaugeage pour la mesure des débits.

Les registres de données sur cette station concernent deux périodes, avant et après des événements catastrophiques qui ont lieu en 1981. Avant 1981, la station était placée dans la ville de Boconó -Station Puente El Zumbador (Fig. II.14); les registres de cette première station couvrent la période allant de l'année 1962 jusqu'à 1981.

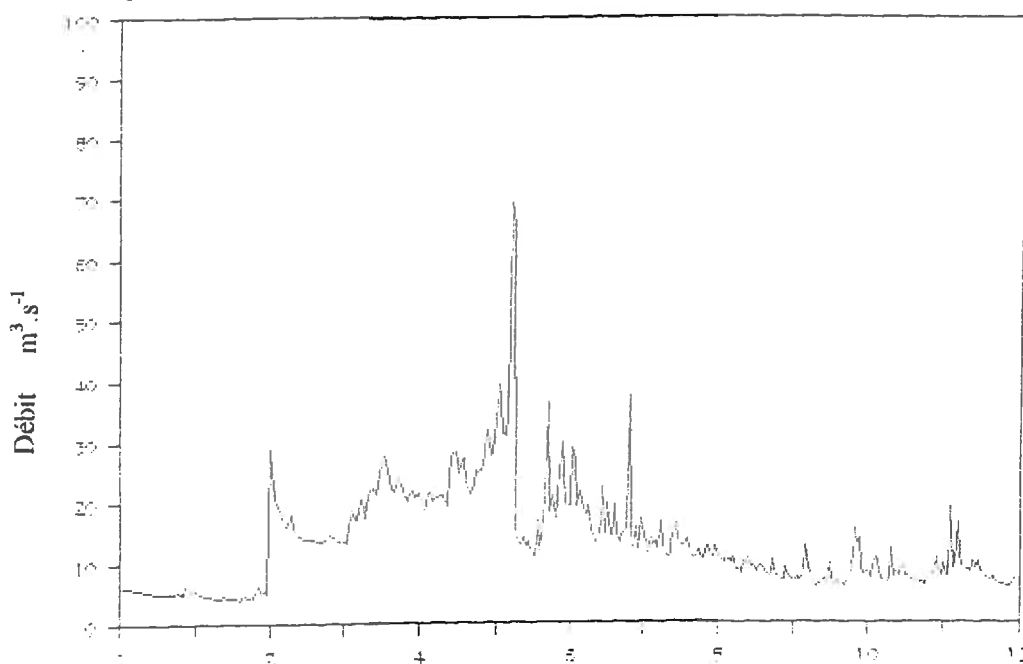


Figure II.14: Hydrogramme de la rivière Boconó avant la confluence Boconó-Burate pour la période 1978-1981. (M.A.R.N.R., 1988)

Une nouvelle station a été mise en service en 1987 (station Las Cavitas) à 4 km en aval de l'ancien emplacement et un nouveau tarage a été réalisé. Pour cette date le débit moyen annuel est de $15,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, (soit une lame écoulée de $1\,095 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$). Pour une pluviométrie moyenne de $1\,550 \text{ mm}$ sur la branche Boconó, le coefficient d'écoulement peut être estimé à 71% environ.

2.4.3 Le sous bassin du Burate

Ce sous bassin draine une surface d'environ 364 Km^2 . Il présente les altitudes les plus importantes de la zone étudiée avec «la Teta de Niquitao» à $4\,000$ mètres. Les dénivelées de ce bassin sont plus importantes que celles de la branche de Boconó; elles atteignent jusqu'à $1\,000$ mètres en 4 Km . (Fig. II.15).

Le réseau hydrographique du Burate montre une valeur de densité de drainage de l'ordre de $7.31 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$. Cette mesure traduit le rapport entre la longueur totale des cours d'eau

et la surface considérée (M.A.R.N.R., 1990). Dans le cas du Burate, cette forte densité de drainage permet des transferts rapides des différents cours d'eau vers la rivière principale. En effet, la distance moyenne parcourue par l'eau pour atteindre le réseau est courte. Les nombreux cours d'eau qui se jettent dans le Burate forment des angles droits avec ce dernier. En général, ces affluents transportent l'eau sur des distances assez courtes, en particulier sur le versant sud. En revanche, pour le versant nord, les affluents drainent des surfaces plus vastes mais plus sèches comme, par exemple, les quebradas Tomón et Coneja. Par ailleurs, la zone humide du bassin versant est constituée par le secteur Vitisay. Ainsi, il n'y a pas de zone d'alimentation importante débouchant dans les derniers kilomètres du Burate avant sa confluence avec le Boconó, ce qui constitue une différence notable avec ce dernier.

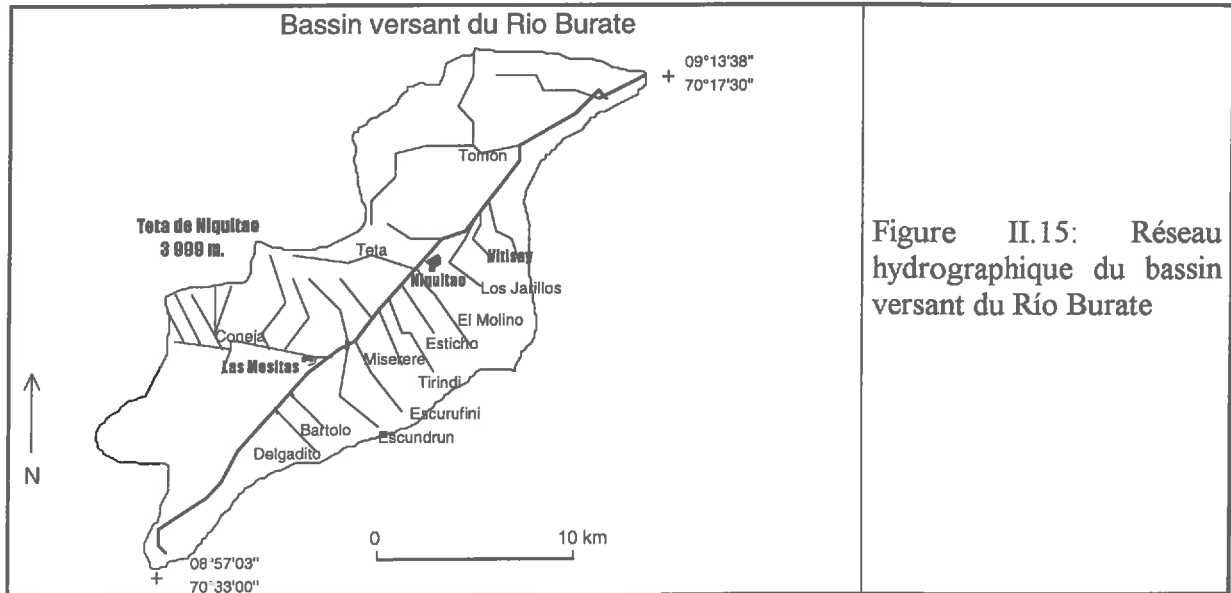


Figure II.15: Réseau hydrographique du bassin versant du Río Burate

Le Burate présente une trajectoire rectiligne et il a construit une vallée très encaissée jusqu'à 3 km avant sa confluence avec le Boconó. C'est juste avant de rejoindre le Boconó que sa vallée s'ouvre un peu pouvant ainsi alimenter une petite nappe alluviale emmagasinée dans les sédiments caillouteux. .

Les données hydrologiques pour ce sous bassin concernent seulement trois années 1965-1967, (station «Paso de Tostós»), les mesures ont cessé car la rivière a emporté l'appareillage pendant un épisode pluvieux. Pour cette période le débit moyen annuel est 9,33 m³/s (soit une lame écoulee de 903 m.ha⁻¹). Pour une pluviométrie moyenne de 1 050 mm. sur ce sous bassin, le coefficient d'écoulement est d'environ 85%. Cet coefficient est plus fort que celui de Boconó. Ceci peut être attribué aux type de couverture végétale, pelouse d'altitude, qui représente 40% environ de la surface du Burate, celle-ci ne couvre pas suffisamment la surface du sol, contrairement à la forêt dense qui abonde sur la branche Boconó. De même, le réseau hydrologique en «arête de poisson» et les pentes présentes dans ce sous bassin favorisent un écoulement et un cheminement de l'eau plus rapide.

2.4.4 Le bassin du torrent Corojó

Ce torrent qui draine environ 25 km² fait partie d'une série d'affluents localisés sur le versant nord du Guaramacal (rive gauche de la rivière Boconó). Il a été choisi pour sa représentativité lithologique par rapport à cette rive du Boconó, mais aussi pour sa localisation à la confluence Burate-Boconó qui facilite une étude simultanée des différents cours d'eau.

La quebrada Corojó se situe entre 1 200 et 2 900 mètres d'altitude et débouche directement sur le Boconó (Fig. II.16).

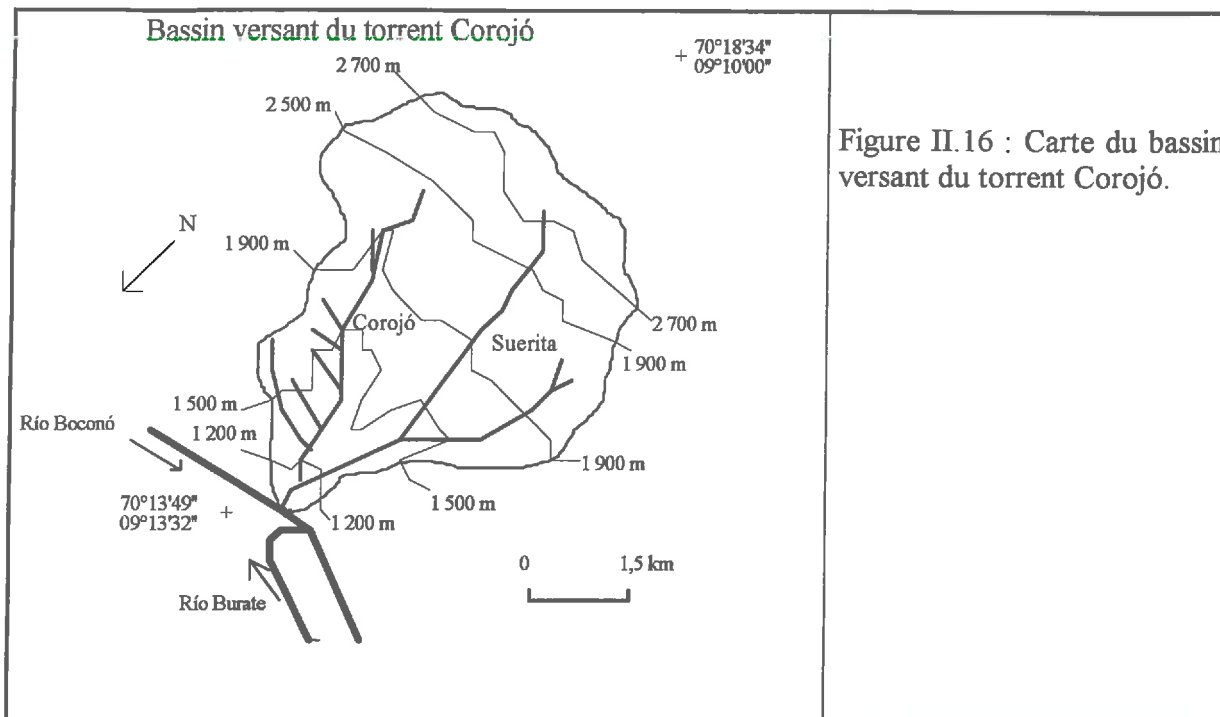


Figure II.16 : Carte du bassin versant du torrent Corojó.

Son bassin versant comporte deux parties. La première est occupée par la Corojó, qui prend naissance vers 2 300 m d'altitude et coule selon une orientation sud-ouest. Durant son parcours, le Corojó recueille plusieurs affluents et sa morphologie, en arête de poisson, rappelle celle du Burate.

Dans la deuxième, la Suerita ruisselle en direction du sud-ouest avec une origine plus lointaine et plus élevée (2 900 m); son axe principal à caractère dendritique est plus long que celui de la Corojó et ressemble plutôt à celui de Boconó.

Pendant son cheminement, elle ne reçoit qu'un affluent de la zone du Páramo de Guaramacal. Ce micro bassin de la Suerita est plus ramifié que celui de Corojó. Aucun type d'information n'existe pour ce torrent.

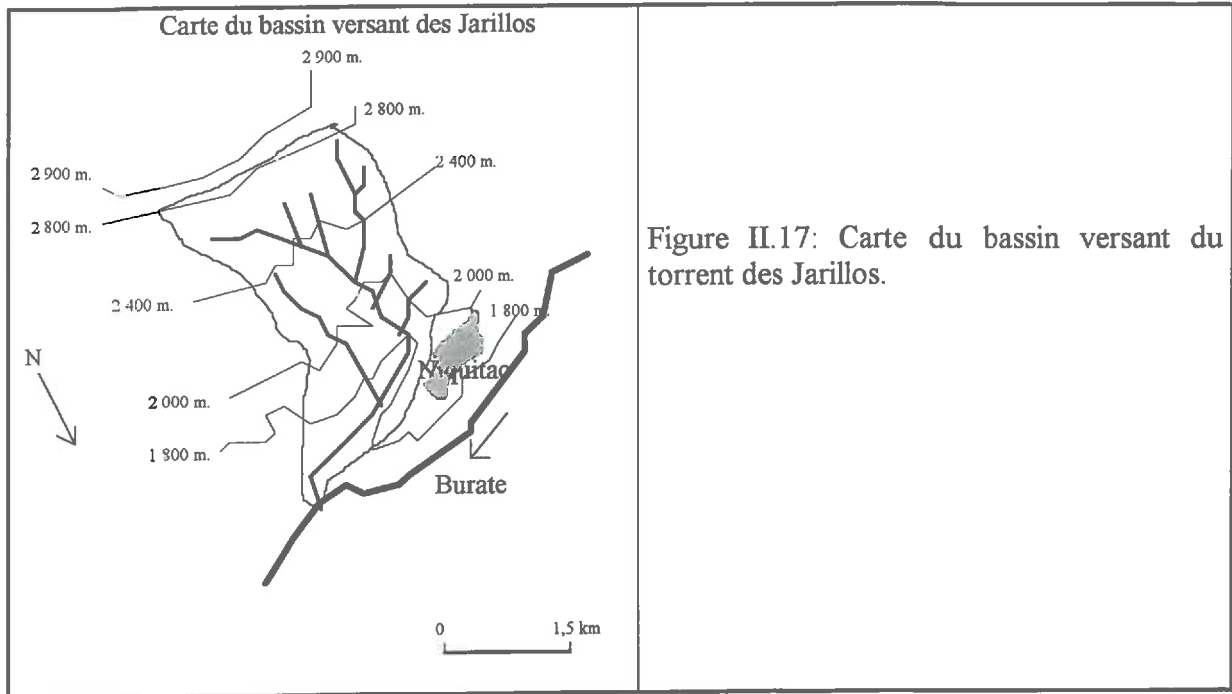
2.4.5 Le petit bassin versant des Jarillos: un exemple de bassin versant sur lutite pyriteuse

Ce petit bassin fait partie du bassin versant du Burate et se situe à proximité du village de Niquitao (Fig. II.17). Il est compris entre 1 600 et 2 780 mètres d'altitude avec une surface voisine de 8 km². Sa localisation sur le versant sud du Guaramacal a permis de reconnaître les mécanismes hydrologiques et géochimiques très particuliers présents dans ce sous bassin.

Il existe une similitude entre ce cours d'eau et les multiples torrents qui constituent le réseau hydrologique de ce secteur comme par exemple, les quebradas Paraparo et Escorá. Il est représentatif de ce secteur par sa lithologie de roches pyriteuses très répandue à l'ouest et au centre de la zone d'étude. Sur le versant nord du Guaramacal, cette lithologie s'étend aussi jusqu'à la branche du Boconó.

En fait, ce bassin est couvert par des lutites pyriteuses et des brèches carbonneuses altérées sur une forte épaisseur et constitue un réservoir d'eau acidulée. La partie amont de ce petit bassin et de ses voisins est constitué de roches cristallines et en altitude les sols probablement moins épais ne constituent pas réellement un réservoir consistant.

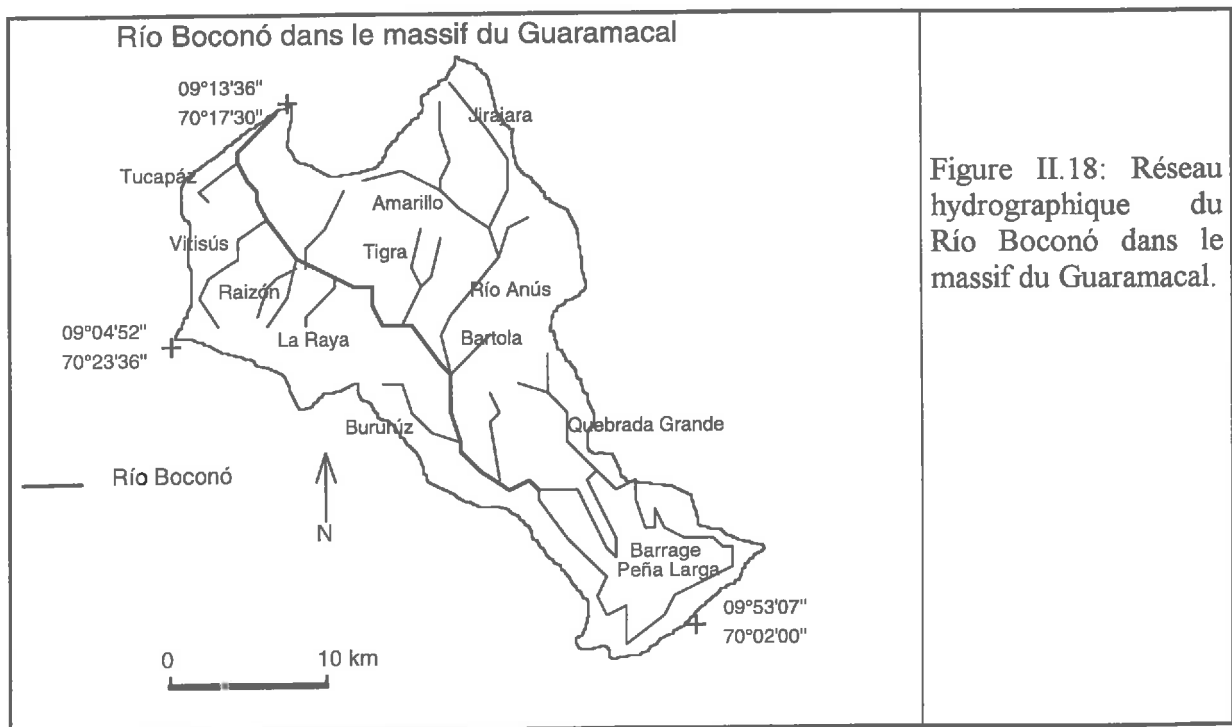
La distance parcourue par ce torrent est courte suivant un lit très encaissé.



2.4.6. Bassin versant du Río Anús et des autres affluent dans le massif de Guaramacal

L'entrée du Boconó dans la plaine des Llanos se fait après la traversée du massif de Guaramacal sur un parcours très pentu d'environ 45 km.

En effet, après la confluence Boconó-Burate en amont, la rivière prend un virage spectaculaire, très vraisemblablement lié à la faille provenant de San Miguel. Le Boconó s'encaisse alors dans les montagnes et reçoit, surtout sur sa rive droite, de nombreux affluents dont les plus importants sont les quebrada Vitisús et Bururúz. Son allure s'apparente alors à une succession de chutes d'eau et rapides.



Sur sa rive gauche, le Boconó conflue ensuite avec le Río Anús qui constitue l'affluent le plus important depuis l'apport du Burate; son bassin qui s'étage entre 2 800 et 400 mètres et couvre une surface voisine de 150 km² (Fig. II.18). Ce bassin du Río Anús se situe dans une zone très pluvieuse.

L'hydrométrie dans ce massif n'a jamais été réalisée. Cependant, à partir des chroniques hydrométriques du Boconó amont et à l'entrée du barrage, il a été possible d'estimer le débit moyen annuel des affluents de ce secteur.

La totalité du flux entrant dans le massif du Guaramacal peut être estimé entre 30-35 m³.s⁻¹. En effet, le Burate à Tostós apporte 9,33 m³.s⁻¹, le débit du Boconó au pont de las Cavitas est 15,55 m³.s⁻¹. Il faut ajouter les affluents quebradas Corojó et Tucapaz, ainsi que les petits affluents du Burate situés entre Vega de Tostós et la confluence.

A l'entrée au barrage le débit moyen annuel est de 77.65 m³.s⁻¹. La différence de flux entre l'amont et l'aval constitue la contribution du réseau hydrographique du Guaramacal qui peut être estimée à approximativement 43 m³.s⁻¹, dont l'essentiel doit être attribué au Río Anús.

2.4.7 Le barrage Peña Larga: exutoire actuel de la partie montagnarde du Río Boconó

Le barrage «Peña Larga», localisé à l'aval de la zone d'étude, forme l'exutoire montagnard du Boconó. Il a été construit en 1985 et la surface inondée couvre environ 8 000 ha. Les données de débits du Boconó à la station Peña Larga, couvrent une période de 25 années allant de 1952 à 1977; pour ces années le débit moyen annuel est de 77,65 m³.s⁻¹. Depuis cette époque, la station a été arrêtée. Le ministère de l'environnement et l'entreprise d'électrification prévoient l'installation d'une autre station de mesure.

La côte limite de la retenue se trouve aux environs de 270 mètres d'altitude.

Pendant la période 1968-1973, la moyenne annuelle des M.E.S. a été estimée à 5x10⁶ ton.an⁻¹ (M.A.R.N.R., 1991). Cet ordre de grandeur donne déjà idée des énormes volumes de sédiments déposés dans le barrage. Malheureusement, la méthode qui a été utilisée pour l'estimation du taux de M.E.S. n'apparaît pas dans les documents consultés.

Lorsque le Boconó arrive au barrage, il se divise en deux, le tronçon droit paraît véhiculer un débit plus important. A partir de la confluence avec le Río Anús, la vallée s'ouvre et la rivière dépose successivement blocs puis cailloux.

La bathymétrie initiale du barrage n'a pu être retrouvée. Le calcul de la surface affectée par le processus de sédimentation sera réalisé dans ce travail en s'appuyant sur la cartographie et les observations de terrain.

2.5 Synthèse des connaissances hydrologiques sur le bassin versant du Río Boconó

Les données hydrologiques concernant le bassin versant du Boconó sont peu abondantes et très ponctuelles. Par ailleurs, les études dans le domaine de l'hydrogéologie et géochimie de l'eau n'existent pas. Des actions hydrologiques ont été menées par l'Université des Andes et le Ministère de l'Environnement; les travaux hydrologiques de Velásquez (1990, 1994) pour la partie amont du Boconó restent les plus précis. En revanche, pour le bassin versant de Burate, il y a un manque total d'information, si l'on excepte, quelques cartes géologiques à petite échelle. La situation est encore plus défavorable pour le massif de Guaramacal où aucune étude n'a été réalisée.

A l'heure actuelle, les bases de données qui existent pour le bassin versant sont plutôt axées sur la gestion de l'espace rural et la mise en place de dispositifs de lutte contre l'érosion.

2.5.1 Typologie des crues du Boconó

Cette typologie repose sur les travaux et données de Velásquez (1990, 1994, 1995 et 1996) et du bureau d'hydrologie du Ministère de l'Environnement établi dans la zone d'étude. Ces données ne concernent que la branche du Boconó en amont de la confluence. Le bassin versant du Burate n'a jamais fait l'objet d'étude hydrologique hormis deux années de mesures de débits au niveau de Tostós

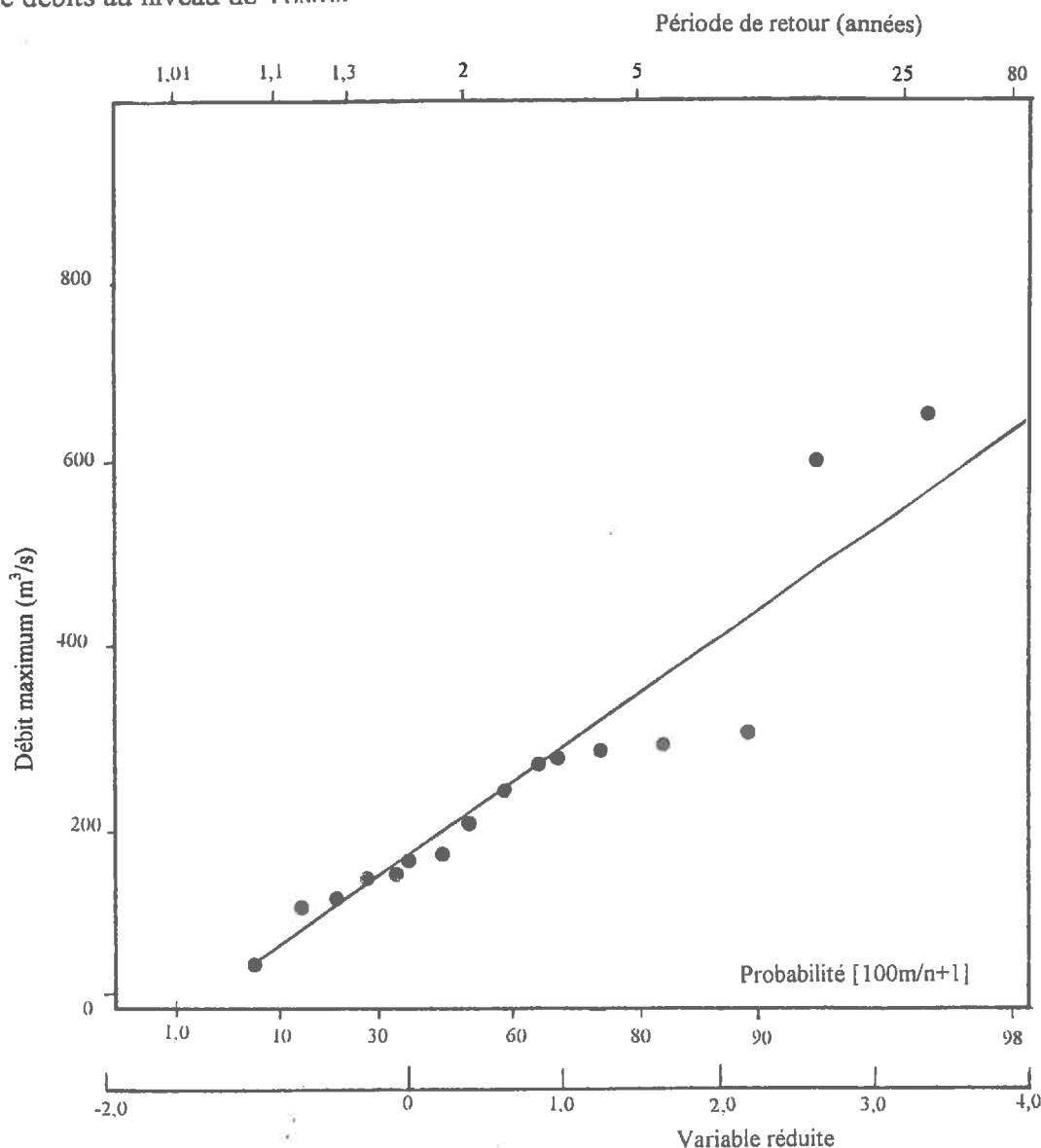


Figure II.19: Fréquence des crues en fonction de leur débit maximum (dessiné d'après Velásquez, 1990).

Les données utilisées concernent deux sites, le premier au pont El Zumbador à la ville de Boconó entre les années 1963 et 1987, et le second à las Cavitas (1988-1990) à 1,5 km de la confluence Boconó-Burate.

La crue du 08/06/81 qui a détruit la station hydrométrique au pont El Zumbador, a eu un débit de $600 m^3 \cdot s^{-1}$ avec un temps de retour estimé à 19 ans. Ceci a conduit le Ministère de l'Environnement à construire la station Las Cavitas en 1988, où une crue de $656 m^3 \cdot s^{-1}$ a été enregistrée en 1990.

D'après Velásquez (1990), les calculs de fréquence réalisés sur une période de 27 ans (1963-1990) indiquent que le temps de retour de 2 ans et 10 ans correspondent à des débits respectifs de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les crues de certaine importance, correspondent à des débits supérieurs à $440 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et ont une probabilité d'occurrence d'environ 10%.

2.5.2 Synthèse des acquis sur le transport de M.E.S

Les données existantes sur les taux de M.E.S. concernent uniquement la branche Boconó. Pour le secteur Burate et Boconó après confluence, il n'existe aucun ordre de grandeur. Le taux moyen annuel de M.E.S. transportées dans le B.V. du Boconó a été mesuré sur deux périodes, 1968-1973 pour la station du pont El Zumbador et 1988-1989 pour le site las Cavitas.

Pour une surface drainée d'environ 448 km^2 jusqu'à la station El Zumbador, les flux de matière en suspension atteignent $1\,403 \text{ ton} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$. Pour le nouveau site de mesure de Las Cavitas drainant une surface de 574 km^2 , le flux de M.E.S. est de $806,5 \text{ ton} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ (Velásquez, 1994).

Bien que précieuses, ces informations restent très générales et imprécises. Pour les bilans d'exportations de matières particulaires sur l'ensemble du bassin, il est indispensable d'avoir des données sur le reste des unités hydrologiques.

2.6. Synthèse sur le milieu naturel

L'ensemble du bassin versant du Boconó est contrasté et bien organisé spatialement. Dans la partie amont, les deux sous bassins principaux sont très différents

Le cours du Burate, avec une trajectoire rectiligne et très pentue, présente un réseau en «arête de poisson». L'altitude moyenne est très élevée (Tableau II.1). La pluviométrie moins importante que sur la branche Boconó limite l'extension d'une végétation protectrice. Dans sa basse vallée des affleurements de lutites charbonneuses et pyriteuses développent des surfaces dénudées sensibles à l'érosion.

Tableau II.1

Principaux traits morphométriques et hydrologiques du bassin versant du Río Boconó

Sous bassin versant	Surface Km^2	Longueur du cours principal m	Altitude moyenne m	Densité de drainage $\text{m} \cdot \text{ha}^{-1}$	débits moyens $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	*C.E. %
Boconó	574	55,5	1 900	6,00	15,55	71
Burate	364	40,0	2 600	7,31	9,33	85
Exutoire		90,5	1 000		77,65	

*C.E.: coefficient d'écoulement.

Le cours du Boconó est plus sinueux et moins pentu que celui du Burate; son réseau hydrographique est dendritique. L'altitude moyenne est inférieure de 700 mètres à celle du Burate, alors que son cours est plus long de 17,5 km. Ce sous bassin est plus arrosé et sa végétation est plus exubérante. Dans sa moyenne vallée une formation d'argilites ferrugineuses localisée au bassin de San Miguel est fortement érodée.

Au niveau hydrologique, il existe une importante différence dans les coefficients d'écoulements des deux sous bassins (71% Boconó et 85% Burate). Ceci met en évidence, l'influence de la morphologie du réseau hydrographique, de la couverture végétale et l'évapotranspiration sur le flux d'eau des rivières.

Malgré ces différences marquées, les sous bassins du Boconó et du Burate présentent quelques similitudes; ainsi, la faille de Boconó, occupée par ces deux rivières, sépare les

formations cristallines métamorphisées au nord de celles moins métamorphisées au sud. Dans cette zone montagnarde andine, les rivières peuvent toutes être considérées comme des torrents.

Cette disparité morphologique et lithologique entre les deux branches principales, drainant des bassins versants de surfaces comparables, constitue une opportunité scientifique. En effet, l'étude comparative de transferts d'eau, d'éléments dissous et particuliers dans ces deux rivières torrentielles permettra peut-être de révéler des mécanismes différents.

CHAPITRE III

METHODOLOGIE D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNEES MISE AU POINT METHODOLOGIQUE ET VERIFICATION DE LA QUALITE DES DONNEES

L'objectif de ce chapitre est la présentation du dispositif expérimental et de la méthodologie d'acquisition des données. Il abordera aussi bien les aspects méthodologiques que métrologiques. Il constitue donc la base indispensable pour apprécier la fiabilité des données et pour apprécier quelles sont les limites de précision pour leur interprétation.

3.1. La démarche retenue

Ce travail a été réalisé en deux étapes, une approche spatiale suivie d'une approche temporelle.

A partir du couplage des approches géochimiques et géostatistiques, l'approche spatiale tentera d'établir une corrélation géographique entre les mécanismes biogéochimiques et le paysage, afin d'identifier les unités fonctionnelles du bassin versant et de déterminer leur signature chimique, isotopique et minéralogique. Cette étape permettra aussi d'établir une typologie des paramètres chimiques et minéralogiques susceptibles d'être utilisés comme marqueurs ou traceurs. La méthodologie d'acquisition visera à collecter des informations de toutes les unités paysagiques du bassin versant, en nombre suffisant dans chacune d'elles, afin d'étudier la variabilité au sein de l'unité et la comparer avec la variabilité entre unités.

L'étape temporelle sera consacrée à l'étude de la dynamique de l'eau, des éléments dissous et des matières en suspension dans le bassin grâce aux traceurs, aux marqueurs et aux signatures définies précédemment. La méthode retenue sera basée sur l'étude des variations temporelles en des points clefs du réseau hydrographique. Contrairement à la première étape, le pas de temps sera alors très fin et le nombre de points d'observations limité.

3.2 Les campagnes de terrain

3.2.1 Cartographie et stratégie de prélèvements spatialisés

Les campagnes spatiales sur le bassin versant du Boconó ont été menées sur deux années, 1994 et 1995. Compte tenu de la faiblesse des connaissances de base initialement disponibles sur le bassin versant, cette partie bénéficiera d'un effort particulier. Les divers objectifs recherchés sont les suivants:

- Couvrir l'essentiel de la surface.

Cette condition est indispensable à l'établissement de cartes relativement fiables.

Ne connaissant pas au départ la structure spatiale des paramètres physico-chimiques, il convient d'adopter un plan d'échantillonnage qui ne s'avère pas trop lâche et qui ne laisse pas de grande surface sans caractérisation physico-chimique ou minéralogique.

- Avoir plusieurs échantillons sur chaque unité paysagique, sur chaque unité lithologique et sur chaque sous bassin important.

Afin de pouvoir comparer l'impact de la lithologie sur les signatures chimiques, il convient de disposer de moyennes fiables sur un nombre suffisant de points pour chaque unité.

- Déceler une variation altitudinale des signatures chimiques et isotopiques, ce qui constitue un objectif particulier du précédent.
Pour vérifier la relation altitude/isotope stable de l'eau, il convient de prélever sur l'ensemble des stations météorologiques et sur un nombre suffisant de sous bassins représentatifs.
- Vérifier la stabilité saisonnière des signatures.
Cette vérification est nécessaire dans la mesure où l'étude des campagnes de prélèvements s'étale sur une longue période. Par ailleurs, elle s'impose pour envisager toute généralisation à une durée pluriannuelle de cette étude qui ne concerne que quelques crues. La variation temporelle des signatures des réservoir, plus fréquente pour les isotopes stables de l'eau que pour les traceurs chimiques (Barriac *et al.*, 1993), complique l'étude des crues (Ribolzi, 1996).
- Essayer de distinguer le mode de distribution géographique (latéral) ou vertical (profil) des unités hydrologiques.
- Déterminer les origines possibles de la matière organique particulière par une étude spécifique de terrain recensant les formes d'érosion

De plus, certains objectifs d'ordre méthodologique sont incontournables. Il s'agit de préciser la représentativité d'un prélèvement localisé dans la section d'un torrent.

Tableau III.1:
Récapitulatif des séries de prélèvements pour l'étape spatiale.

Série	Unité échantillonnée	Date	Nombre d'échantillons	Nature du prélèvement
S	L'ensemble du bassin versant	juillet 1994 période de pluies	141	Eau
T'	Transept dans la section aval de l'exutoire	juillet 1994 période de pluies	20	Eau
R	L'ensemble du bassin versant	Novembre 1994 période de sécheresse	41	Eau
G	Massif du Guaramacal	juillet 1995 période de pluies	24	Eau
C	Secteur Vitisay	juillet 1995 période de pluies	19	Eau
PI	l'ensemble des stations météorologiques	juillet 1995 période de pluies	10	Eau
Q	Branches Burate et Boconó	juin 1996 période de pluies	56	Litières, végétaux et horizons humiques

Pour atteindre ces objectifs plusieurs campagnes ont été réalisées. Elles sont repérées par une lettre majuscule.(Tableau III.1):

- deux campagnes en période humide 1994 et 1995 (série S): L'effort dans cette période se justifie par le fait que les signatures relevées avant les crues permettront de mieux étudier les crues.
- campagne en période sèche 1994: cette campagne permettra d'observer les possibles variations saisonnières des signatures (série R).

- campagne spéciale dans le massif de Guaramacal 1995 par hélicoptère (série G). Pendant l'année 1994, l'échantillonnage fut impossible à cause des problèmes d'accessibilité dans ce secteur très pentu et couvert d'une forêt très dense.
- campagne spéciale «zones acides» 1995 (série C): révélée par quelques échantillons en 1994, cette zone a été échantillonnée de manière plus détaillée car il s'agit de surfaces sensibles à l'érosion et qui présentent un grand intérêt au niveau de l'étude des processus chimiques.
- campagne spéciale de prélèvement des sédiments du barrage: ces sédiments situés dans différentes positions géomorphologiques peuvent nous donner des informations sur les types de crues passées afin de généraliser les résultats obtenus sur les crues étudiées.
- campagne spéciale isotopes stables de l'eau de pluie: pour montrer la possible relation isotope/altitude, 10 stations météorologiques ont été échantillonnées sur la partie amont et centre du bassin versant (série Pl).
- campagne spéciale de prélèvements de végétaux et d'horizons humifères afin de connaître les mécanismes de distribution du carbone organique particulaire et les signatures des différents compartiments. Afin de reconnaître les origines de M.E.S. organique véhiculées par les cours d'eau, il est indispensable d'échantillonner spatialement végétaux et horizons humiques (série Q).

Au niveau méthodologique, la représentativité d'un prélèvement ponctuel par rapport à la section du cours d'eau a été réalisée en milieu de décrue à l'exutoire en dix points régulièrement répartis entre les deux berges et à deux profondeurs différentes (série T').

L'essentiel des points de prélèvements figure sur les cartes relatives aux différents secteurs du bassin versant (Fig.III.1,2,3,4,5 et 6).

3.2.2 Localisation des mesures et prélèvements temporels

L'étape temporelle a comporté deux campagnes au cours des années 1994 et 1995 (Tableau III.2):

Tableau III.2
Récapitulatif des séries de prélèvements pour la partie temporelle.

Série	Nom de la rivière	date/heure début	date/heure fin	pas de temps	nombre d'échantillons
A	exutoire	15 juillet 1994 à 10h 50 mn	17 juillet 1994 à 14h 53 mn	5 mn	156
B	Boconó au pont el Zumbador	15 juillet 1994 à 06h 45 mn.	16 juillet 1994 à 14 h 03 mn	3-5 mn	229
L	Quebrada Corojó	09 juillet 1995 à 14h 56 mn	10 juillet 1995 à 18h 15 mn	5 mn	125
T	Boconó avant confluence	09 juillet 1995 à 14h 56 mn	10 juillet 1995 à 18h 23 mn	5 mn	113
H	Burate	09 juillet 1995 à 15h 56 mn	10 juillet 1995 à 17h 46 mn	5 mn	113
M	Mélange Boconó-Burate	09 juillet 1995 à 15h 24 mn	10 juillet 1995 à 18h 40 mn	4 mn	111
K	Quebrada los Jarillos	17 juillet 1995 à 10h 50 mn	17 juillet 1995 à 13h 42 mn	5 mn	18

La première crue échantillonnée dans la rivière Boconó s'est déroulée les 15 et 16 juillet 1994. Les prélèvements ont été réalisés simultanément en deux points: à l'ancienne station hydrologique El Zumbador, dans la ville de Boconó, et au barrage. Pour cette crue le nombre d'échantillons atteint respectivement 229 et 156. Pour la partie amont, les 229 échantillons (notés série B) correspondent à 115 pas de temps pour lesquels deux échantillons ont été prélevés à quelques mètres de distance pour vérifier la représentativité des solutions dans le flux d'eau. L'écart entre 2×115 et 229 est dû à un échantillon accidentellement détruit. Pour les 156 prélèvements réalisés à l'exutoire, une vingtaine de répétitions ont été effectuées selon le même protocole que ceux de la série B.

La deuxième campagne s'est déroulée du 9 au 10 juillet 1995. Les efforts ont porté sur la confluence Boconó-Burate-Corojó. Des échelles limnigraphiques ont été installées sur chaque point de mesure: Boconó avant la confluence, Burate, Boconó après sa confluence avec le Burate et la quebrada Corojó (Fig.)

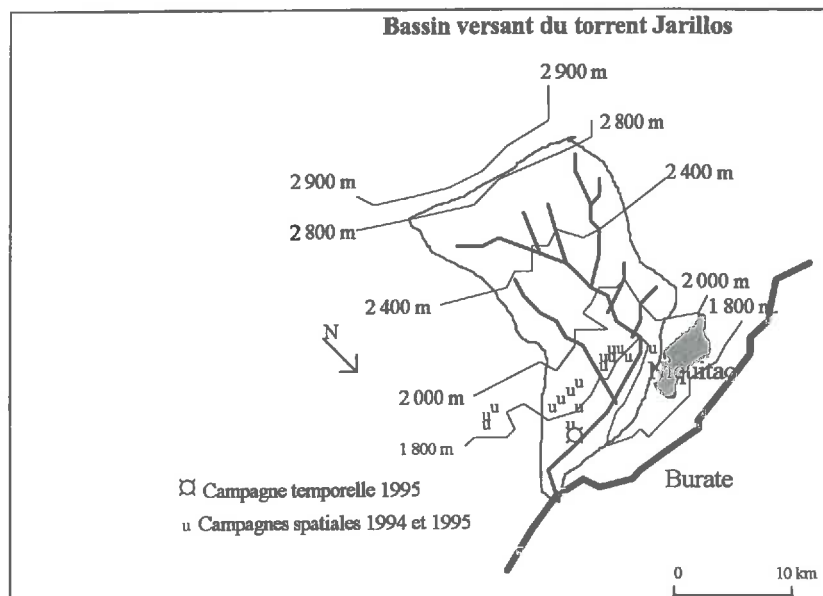


Figure III.1: Carte du bassin versant du torrent des Jarillos. Localisation des sites de prélèvement.

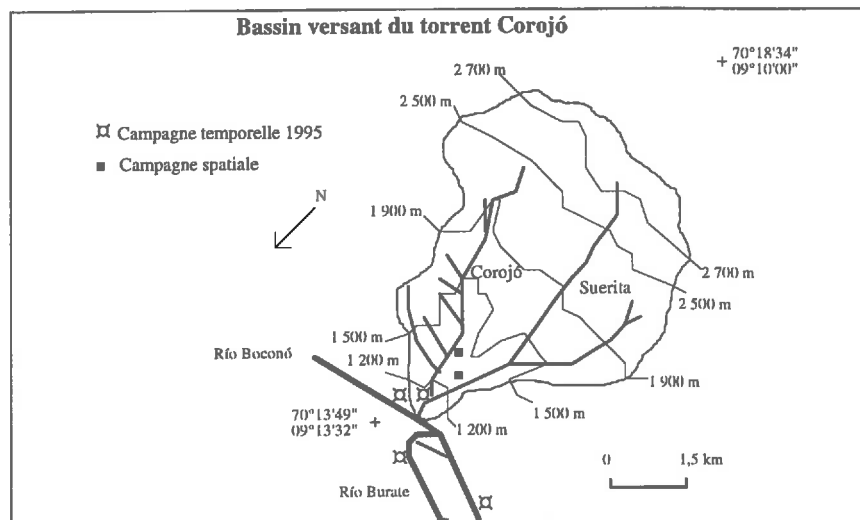


Figure III.2: Localisation des sites dans le torrent Corojó

Pour les séries T, H et L, un échantillonnage a été effectué la veille et le lendemain de la crue. Pour le cas de la quebrada Corojó, cette collecte complémentaire a été aussi réalisée sur les deux branches principales, la Suerita et Corojó avant confluence avec la Suerita.

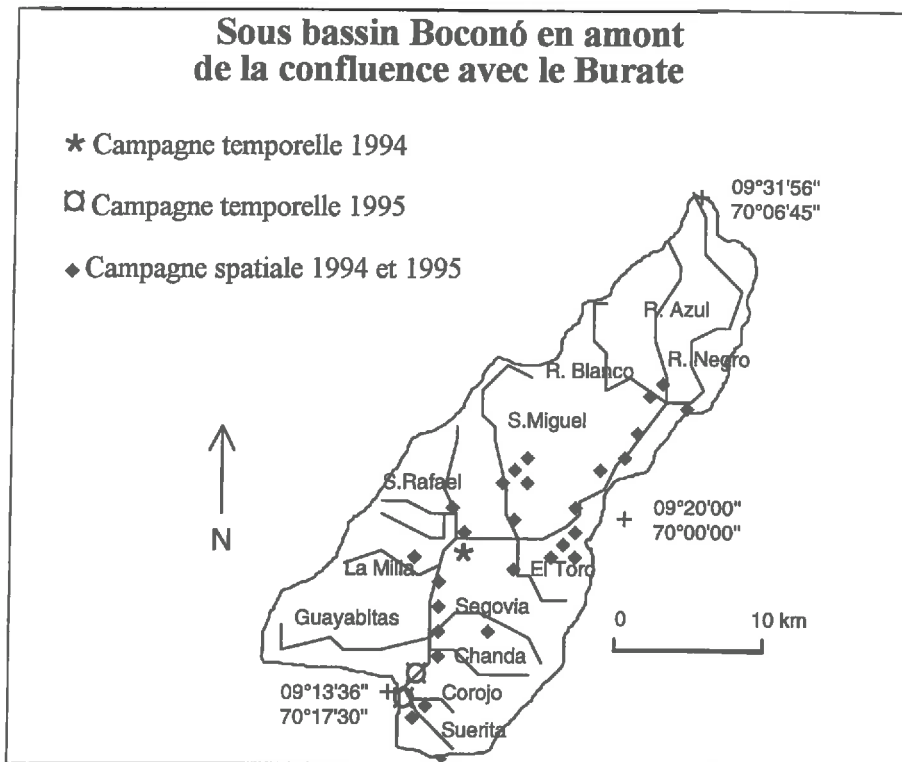


Figure III.3: Réseau hydrographique du sous-bassin du Río Boconó avant sa confluence avec le río Burate.

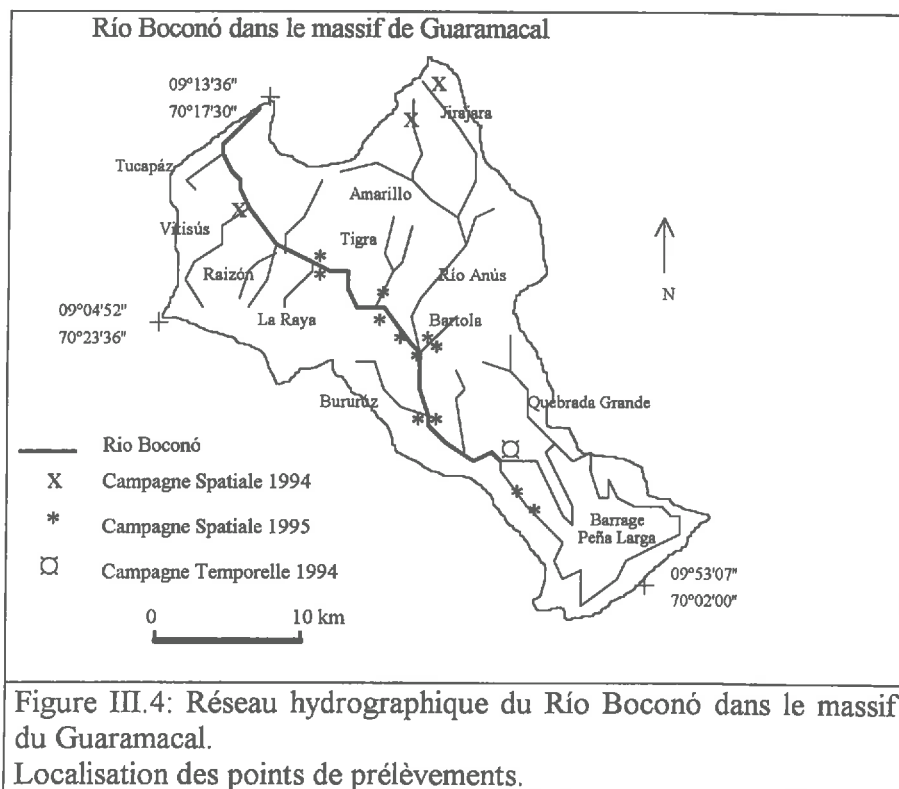


Figure III.4: Réseau hydrographique du Río Boconó dans le massif du Guaramacal.

Localisation des points de prélèvements.

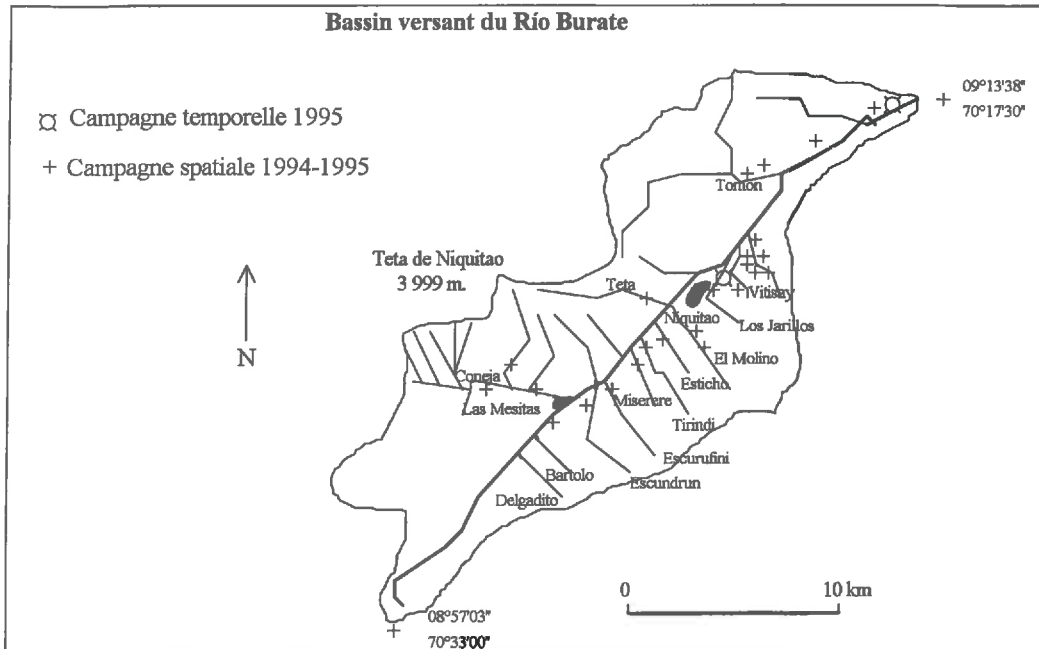


Figure III.5 : Réseau hydrographique du bassin versant du Río Burate.

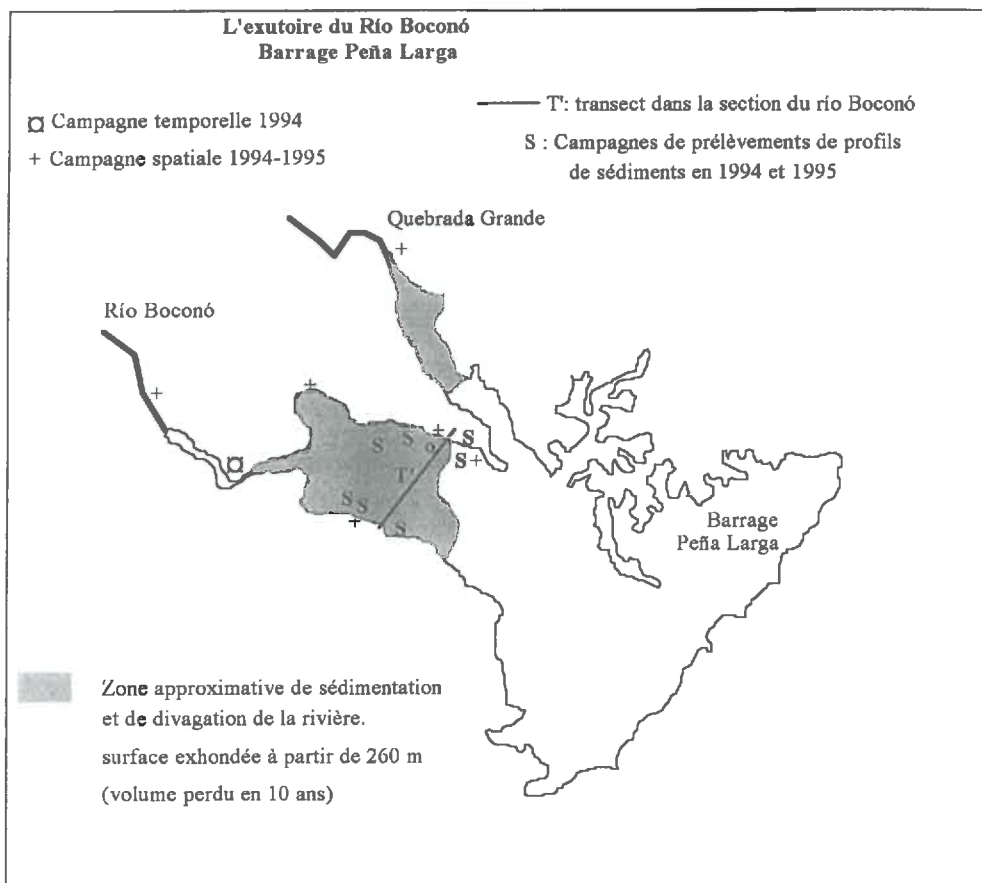


Figure III.6: Carte de localisation des prélèvements à l'exutoire et dans le barrage.

3.2.3 Description sommaire des épisodes pluvieux étudiés

Crue du Boconó étudiée dans la ville de Boconó et à l'exutoire les 15-16 juillet 1994

Pendant cette année la période de pluies est précoce; elle débute dès le mois de mai avec des averses assez importantes sur l'ensemble du bassin versant. Au moment de

l'événement étudié (15-16 juillet 1994), les sols étaient déjà saturés et le débit de base des cours d'eau était important.

L'observation depuis l'exutoire montre que selon le schéma habituel pour cette région, les masses nuageuses provenant des «Llanos» ont remonté le versant sud du Guaramacal vers la haute montagne.

La pluie a commencé sur la ville de Boconó le 15 juillet vers 5h30 pour s'interrompre vers 9h00. Elle recommence vers 11h00 pour s'arrêter définitivement vers 13h00. Cette averse est très irrégulière et peu abondante.

Un second épisode de pluie a provoqué une seconde crue le lendemain. La lame d'eau précipitée atteint un maximum de 5,7 mm à la station Boconó-Aéroport. (Tableau III.3). Cette pluie fut plus homogène spatialement et moins dispersée dans le temps que celle du 15.

Tableau III.3:
Chronologie des hauteurs précipitées pour l'épisode de 1994. Valeurs exprimées en mm.

15-07-1994 Heure	Boconó-Aéroport	Páramo la Cristalina	Peña Larga
01h00-03h00	0,9	0,4	00,0
04h00-06h00	0,2	0,3	01,0
07h00-09h00	3,0	5,2	16,9
10h00-12h00	0,9	4,2	01,9
13h00-15h00	2,2	0,9	17,9
16h00-18h00	0,0	0,0	00,0
19h00-21h00	0,0	0,0	00,0
22h00-24h00	0,0	0,0	02,4

16-07-1994 Heure	Boconó-Aéroport	Páramo la Cristalina	Peña Larga
01h00-03h00	0,0	0,0	00,8
04h00-06h00	0,0	0,8	04,2
07h00-09h00	2,6	0,0	13,8
10h00-12h00	1,9	1,3	02,2
13h00-15h00	3,6	0,1	16,6
16h00-18h00	0,0	0,0	00,0
19h00-21h00	5,6	0,0	00,0
22h00-24h00	0,1	0,0	00,0

Il n'a pas plu sur les autres stations localisées dans la branche du Boconó.

Pendant cette crue, l'équipe de Velásquez (Université des Andes) a réalisé deux mesures de hauteur d'eau et de débits à la station de las Cavitás, ce qui a permis de calibrer les relations débit/limnigraphie pour cette crue sur le point de mesure situé 1 km en amont. Les débits maxima sont de l'ordre de $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui situe cette crue un peu au dessous de la moyenne avec un temps de retour de 1,5 an.

Crués du Boconó, Burate et Corojó étudiée à leur confluence les 9-10 juillet 1995

L'épisode de pluie retenu pour cette année est celui du 9 au 10 juillet 1995, c'est à dire pendant la période de pluies. Celle-ci semble être plus sèche qu'en 1994. Cependant, le 9 juillet depuis 8h00 des petites averses locales ont eu lieu jusqu'à aux environ de 11h00. C'est à partir de 15h00 que les pluies se développent dans le centre du bassin versant. Par les observations directes sur le terrain, nous avons constaté le mouvement des nuages remontant le massif de Guaramacal pour arriver jusqu'à la confluence Burate-Boconó puis envahissent progressivement la branche Burate. Les données météorologiques qui ont été fournies

présentent quelques légères incohérences entre quantités horaires et cumuls journaliers. Elles sont cependant reportées dans le tableau III.4.

Les débits maximum sont de l'ordre de $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui situe cette crue un peu au dessus de la moyenne avec un temps de retour de 2,5 an.

Pendant cette année 1995, les efforts ont porté sur la mesure simultanée des débits sur les quatre points de mesures situés à la confluence principale. Comme pour l'année précédente, quelques mesures de débit et de hauteur réalisée simultanément par l'équipe de Velásquez nous a permis de calibrer l'ensemble des mesures de débit à la confluence (§ 3.5.1).

Tableau III.4
Pluviométrie enregistrées dans les différentes stations du bassin le 9 juillet 1995.

	Pára. Cristal.	Boconó MOP	Tostós	Campo Elías	Las Mesitas	Niquit.	Boconó Aero.	Páram. Guara.	Río Negro
12h00	0,2	0,9	1,6	0,6	0,5	2,3	1,4	0,1	0,4
13h00	0,0	0,0	1,6	1,3	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0
14h00	0,0	0,1	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	7,4
15h00	2,4	1,3	0,2	0,7	0,0	0,2	5,4	3,1	0,0
16h00	0,0	0,0	1,7	1,1	3,2	3,2	0,0	0,0	0,4
17h00	2,4	0,5	0,0	5,3	5,5	1,9	1,0	11,4	4,6
18h00	1,0	0,4	5,5	0,6	0,6	1,6	4,8	3,5	3,6
19h00	0,7	1,0	0,8	2,2	1,7	1,7	0,8	0,1	1,3
20h00	0,7	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9
21h00	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0
22h00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23h00	0,6	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
24h00	0,2	0,1	0,4	0,2	0,0	0,8	0,0	0,0	0,8
Total 9/07	7,9	6,6	14,3	23,8	17,4	15,8	19,4	24,2	24,1
Total 8/07	0,8	0,6	4,1	0,7	1,3	3,8	2,5	2,8	0,8

La petite crue des Jarillos du 14 juillet 1995

Cet épisode intervient juste 5 jours après celui décrit précédemment. Les sols du secteur Vitisay étaient gorgés d'eau et alimentaient de nombreux suintements dans les zones lutitiques.

Le 14 juillet, les précipitations sont très faibles dans la zone Tostós-Niquitao-Boconó (Tableau III.5). Le site étudié des Jarillos est géographiquement encadré par Tostós et Niquitao; il se situe à proximité même de Niquitao.

Les mesures ont commencé juste à la fin de l'épisode pluvieux sur le bassin versant. A ce moment, des ruissellements ont été observés et prélevés dans la zone des lutites pyriteuses, ce qui atteste d'une réaction du bassin malgré la faible quantité d'eau précipitée.

Tableau III.5:
Pluviométrie enregistrées dans les différentes stations du bassin le 14 juillet 1995.

	Páramo Cristal.	Boconó MOP	Tostós	Campo Elías	Las Mesitas	Niquit.	Boconó -Aérop.	Páramo Guara.	Río Negro
TOTAL 14/07	1,3	0,9	1,6	1,5	0,6	0,4	4,4	15,5	1,4

3.3 Description de la métrologie.

3.3.1 Mesures de terrain

Les campagnes spatiales;

Les échantillons ont été collectés dans des flacons de polyéthylène de 260 cm³ à double fermeture et remplis en totalité sous l'eau afin de ne pas enfermer d'air. Pour chaque échantillon, le pH, la température, le potentiel redox (Eh) et la conductivité électrique ont été mesurés sur place sur une fraction aliquote.

Les campagnes temporelles:

Ces prélèvements ont été réalisés dans des flacons en polyéthylène de 260 cm³ et ont subi le même traitement que pour l'étape spatiale. (c.f. Tableau III.2)

Des mesures de hauteur d'eau ont été effectuées, celles-ci ont permis la calibration de la courbe de tarage pour les deux principales rivières.

3.3.2 Mesures de laboratoire

Pour l'ensemble des échantillons 1994 et 1995, la procédure de traitement en laboratoire a été commune à l'ensemble des échantillons. Les échantillons ont été ouverts après décantation de plusieurs jours. Le surnageant a été prélevé délicatement en siphonnant à la pipette et microfiltré sur des filtres d'acétate de cellulose à 0,45 µm de porosité. Le pH et la conductivité de laboratoire ont alors été mesurés. Les microfiltres ont été pesés après séchage à 100°C à l'étuve, de même que des coupelles d'aluminium dans lesquelles les sédiments déposés au fond des flacons ont été transférés en totalité. Le poids de sédiment a été calculé par différence des pesées des coupelles et des microfiltres avant et après réception des sédiments. Compte tenu des taux élevés de sédiments, la contribution des matériaux présents sur les microfiltres est tout à fait négligeable. Les coupelles et les microfiltres ont fait l'objet d'observations de la couleur.

Traitements pour les éléments dissous:

Le choix des éléments dissous analysés dépend de l'origine des eaux.

L'alcalinité a été dosée par titration acide pour les échantillons de la crue 1994 (série A et B). Des contrôles réalisés tous les 10 échantillons ont permis de vérifier que l'alcalinité totale est égale à l'alcalinité carbonatée. Les anions majeurs ont été dosés sur la totalité des échantillons à l'électrophorèse capillaire à l'unité INRA Science du sol d'Avignon. Les cations majeurs ont été dosés sur la totalité des échantillons par spectrométrie de flamme et en partie par électrophorèse capillaire, respectivement à l'Université et l'INRA d'Avignon. L'analyse des terres rares pour les eaux acides par ICP et ICP-MS a été réalisée au laboratoire de géochimie de l'Université de Zaragoza, Espagne, au CIRAD de Montpellier et au laboratoire CNRS de Géochimie-Pétrologie de Toulouse (laboratoire commun Université Paul Sabatier, Toulouse). Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ ont été réalisées sur la pluie, les cours d'eau et les crues de 1995 au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon.

Traitements pour les matières en suspension (M.E.S.):

Les sédiments ont fait l'objet de mesures granulométriques selon 8 fractions (0-50; 50-100; 100-200; 200-315; 315-500; 500-1000; 1000-2000 et >2000 µm) pour l'ensemble des échantillons spatiaux et des sédiments du barrage récoltés en 1994 et pour tous les échantillons récoltés en 1995.

Une étude minéralogique par diffractométrie rayons X a été réalisée sur la crue des 15-16 juillet 1994 à la ville de Boconó, sur la totalité des sédiments, sans distinction de la granulométrie.

Le taux de carbone organique, le $\delta^{13}\text{C}$ et le rapport C/N ont été dosés sur la fraction 0-200µm. de la plupart des sédiments de la crue de 1995.

Enfin, une identification pétrographique d'échantillons de roches ont la détermination pétrographique était délicate a été réalisée pour le laboratoire de géochimie de l'Université de Zaragoza, Espagne, a partir de lames minces et observation sous microscope polarisant.

3.4 Les modèles utilisés pour le traitement des données

Dans un bassin versant mal connu, l'acquisition des données en vue de la mise en évidence des mécanismes principaux régissant les transferts constitue une priorité. Cependant, le traitement des données par des modèles peut constituer une étape utile à plus d'un titre:

- Le recours aux modèles permet de traiter les données et de les convertir en grandeurs plus facilement interprétables; c'est le cas du calcul des activités par les modèles d'équilibres thermodynamiques ou bien des cartes issues des calculs de géostatistiques.

- La modélisation des processus déduits des observations et des mesures permettent aussi de simuler les variations de paramètres mesurés lors d'événements pluvieux; la confrontation entre les simulations et les observations peut permettre de mettre en évidence des lacunes dans l'étude des mécanismes ou, au contraire, de vérifier que les hypothèses retenues suffisent à expliquer l'essentiel des variations observées.

Ce paragraphe est consacré à la présentation des outils statistiques et des modèles qui seront utilisés dans cette étude, de leur bases et des objectifs visés.

3.4.1 Modèle géostatistique

Afin de faciliter la délimitation des différentes unités hydrochimiques, le krigeage sera utilisé pour établir des cartes d'iso valeurs de concentrations. Cette méthode d'usage courant ne fera pas l'objet de recherches spéciales pour ce travail.

Le krigeage est une méthode d'estimation linéaire non biaisée des valeurs d'un paramètre en un point quelconque de l'espace à partir des valeurs connues en différents points. La méthode consiste dans un premier temps en l'étude de la structure spatiale du paramètre au moyen du variogramme. Après ajustement d'une fonction mathématique sur le variogramme expérimental, et de la distance du point où l'on veut estimer la valeur du paramètre avec les points de mesures, il est possible de calculer les poids respectifs des points connus pour l'estimation sur le point choisi.

3.4.2 Outils statistiques

L'approche statistique utilisée dans ce travail mettra en oeuvre les matrices de corrélations, l'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (A.F.C.).

La matrice des corrélations et l'A.C.P. réalisée sur la matrice des corrélations permet de déterminer les paramètres fortement corrélés et de détecter ainsi une redondance d'information. Dans ce cas, il sera avantageux de ne garder que l'un d'entre eux.

Le premier plan factoriel de l'A.C.P. permet en outre de réaliser une approche EMMA (*c.f.* Chapitre I) et dans le plan le plus discriminant. La mise en évidence du nombre minimum de pôles est ainsi facilitée. De plus, la proximité entre les paramètres dans le premier plan factoriel suggère parfois une origine commune.

L'A.F.C. sera utilisée afin de préciser l'évolution des caractéristiques chimiques globales des eaux lors des différentes phases des crues. Comme pour l'A.C.P., cette approche pourra permettre de mettre en évidence le nombre minimal de pôles impliqués dans le mélange d'eau arrivant à l'exutoire d'un sous-bassin.

3.4.3 Modèle thermodynamique d'interprétation et de simulation des processus chimiques

La composition chimique des eaux est déterminée par des processus de mélange entre eaux d'origines diverses et à des processus bio-géochimiques qui modifient leurs

caractéristiques. Dans ce dernier cas, l'information véhiculée par cette concentration est altérée voire perdue. Ainsi, avant d'utiliser un élément chimique comme traceur, il convient donc de déterminer s'il n'est pas sujet à de tels processus.

Les processus physico-chimiques tels que les échanges ioniques entre solution et phases solides, en particulier colloïdales, ou les phénomènes de dissolution ou de précipitation de minéraux sont régis par le potentiel chimique μ_i de l'espèce i dans la phase aqueuse et les différentes phases solides.

Pour estimer ce potentiel chimique à partir des concentrations déterminées en laboratoire des modèles d'équilibres thermodynamiques ont été élaborés par des géochimistes.

Pour les solutions infiniment diluées,

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln(m_i) \quad (1)$$

avec

m_i , molalité de l'espèce i (moles.kg d'eau⁻¹)

R constante des gaz parfaits

T température absolue (en degrés kelvin, °K)

μ_i° potentiel standard (Joules.mole⁻¹)

Dès que les solutions sont plus concentrées la relation (1) n'est plus vérifiée. Il convient de la remplacer par

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln(a_i) \quad (2)$$

avec a_i activité chimique de l'espèce i

$$a_i = m_i \cdot \gamma_i$$

γ_i est le coefficient d'activité qui traduit diverses interactions entre l'espèce i et le solvant ou les autres solutés.

Différents modèles permettent d'estimer a_i ;

Les modèles dits d'interaction ioniques, particulièrement adaptés aux saumures prennent en compte un grand nombre d'interactions (interaction coulombiennes, polarisation,..). Ils nécessitent un grand nombre de paramètres d'ajustement et n'intègrent pas implicitement la formation de complexes, espèces chimiques très abondantes dans les eaux naturelles.

Pour cette étude, les modèles dits «d'association ioniques» seront préférés. Ils ne prennent en compte que les interactions coulombiennes mais intègrent aussi le phénomène de complexation. Ils reposent en général sur la loi de Debye-Hückel, (1923) étendu aux solutions salées avec ou sans la fonction de déviation de Scatchard (1936) qui permettent leur utilisation jusqu'à des forces ioniques de 0,5 à 1,0; soit environ la salinité de l'eau de mer.

Le modèle retenu, AQUA (Vallès et de Cockborne, 1992) est un modèle d'association ionique utilisant la loi de Debye-Hückel avec une fonction de déviation validée jusqu'à des forces ioniques de 5,0 ou 6,0; ce qui déborde largement le cas qui sera traité dans cette étude. En effet, pour la plupart des échantillons traités dans cette étude, la force ionique est inférieure à 0,01.

A partir des concentrations en éléments dissous, de la mesure du pH et du Eh (potentiel d'oxydoréduction) AQUA calcule les activités des différentes espèces chimiques. Il teste alors l'état de saturation par rapport aux différents minéraux afin de détecter d'éventuels processus de dissolution ou de précipitation. A partir de la mesure de l'alcalinité carbonatée et du pH, il estime la pression partielle équilibrante en CO₂. Ce paramètre peut être utilisé comme indicateur de la profondeur de l'origine des eaux (Ribolzi, 1996; Merlo *et al.*, 1996). En effet, les équilibres carboniques sont relativement rapides (Stumm et Morgan, 1980). Ainsi, au delà de quelques dizaines de minutes, les eaux profondes atteignent l'équilibre avec la teneur en CO₂ de l'encaissant. La pCO₂ peut alors informer sur l'ambiance physico-chimique de ce

milieu. A l'inverse, lors de l'écoulement à l'air libre, la pCO₂ initiale est altérée par les échanges gazeux avec l'atmosphère. Ainsi, les pCO₂ calculées avec AQUA dans les eaux de rivière peuvent caractériser l'origine de l'eau (Ribolzi, 1996), mais les échanges avec l'atmosphère peuvent constituer un obstacle en particulier en milieu torrentiel.

Une option permet de simuler la remise en équilibre entre la solution et divers minéraux sous différentes conditions de potentiel d'oxydoréduction ou de pression partielle en CO₂. Il devient alors possible de simuler les processus d'altération des roches mères et d'étudier les processus d'acquisition des signatures chimiques des différents réservoirs hydrologiques.

3.4.4 Modèle hydrologique de surface

Le modèle utilisé est dérivé des travaux de Moussa (1991,1994). Il comporte deux parties. La première simule la transformation du signal pluie en courbe de débit à la sortie d'un bassin versant élémentaire. La seconde simule la propagation de l'onde issue du bassin versant élémentaire dans le réseau hydrographique.

Transformation du signal pluie efficace en hydrogramme d'un bassin élémentaire:

La méthode utilisée est celle du noyau d'Hayami (1951) selon la formulation proposée par Jin (1992) et Bras et Rodriguez-Iturbe (1989).

$$Q_i(t) = \frac{1}{S_i} \sqrt{\frac{w}{\pi}} \cdot \frac{\exp\left(2 - \frac{t}{w} - \frac{w}{t}\right)}{\left(\frac{t}{w}\right)^{3/2}} \cdot p \quad (3)$$

avec

Q_i(t) = hydrogramme de sortie du bassin versant élémentaire

Q = le débit et t le temps

w = L/C

L = trajet moyen de l'eau jusqu'à l'exutoire du bassin élémentaire

C = célérité de l'onde

p = pluie efficace

S_i = surface du bassin élémentaire

Cependant, la connaissance des limnigrammes de bassin versants élémentaires situés sur le flanc des vallées du Boconó et du Burate permettent éventuellement de s'affranchir de cette étape.

Propagation de l'onde issue d'un bassin versant élémentaire dans le réseau hydrographique:

L'onde issue du bassin versant élémentaire se propage dans le réseau hydrographique avec une certaine célérité C (Q) et une atténuation D (Q):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -C \frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (4)$$

La discrétisation est réalisée selon le schémas numérique implicite de Cranck-Nicholson (Richtmeyer et Mourtou, 1969). Le calcul consiste à déterminer l'hydrogramme de sortie de chaque sous-bassin élémentaire, puis de simuler sa contribution à l'hydrogramme général. Connaissant à un noeud du réseau les débits instantanés issus de chaque bassin élémentaire situés en amont, ainsi que la signature chimique de chacun d'entre eux, il est alors

possible de recalculer le chimiogramme résultant à partir de l'équation de mélange. C'est une adaptation au modèle de Moussa (1994), réalisée dans ce travail.

Ainsi, pour un traceur dont les concentrations C_1 et C_2 caractérisent les débits Q_1 et Q_2 de deux branches qui confluent, l'équation de mélange sera:

$$Q \cdot C = Q_1 \cdot C_1 + Q_2 \cdot C_2 \quad (5)$$

avec Q , le débit liquide du mélange et C sa concentration.

Pour beaucoup d'éléments chimiques, cette relation est vérifiée à l'échelle temporelle de la crue. Pour des mélanges d'eaux de faciès chimiques très contrastées, des précipitations massives peuvent survenir dès la confluence (Auque, 1993; Gimeno, 1992). L'équation (5) de mélange n'est alors plus valable, mais ces cas sont rares. Ils affectent des confluences mineures du bassin étudié (Chapitre IV).

Les modèles hydrologiques de surface, tels que celui de Moussa (1994) prennent en compte une pluie efficace, fraction de la pluie totale et qui ruisselle. Appliquée sur la surface de bassins élémentaires, elle est transformée en hydrogramme unitaire qui pénètre dans le réseau hydrographique. L'équation (4) permet de simuler alors, bief après bief, la propagation de cette onde, avec l'addition successive des ondes issues des autres bassins élémentaires.

Cette modélisation s'adapte bien aux écoulements en milieux pentus, sans échanges entre le cours d'eau et la nappe alluviale. Lorsque ce mécanisme existe, il est nécessaire d'adapter les modèles d'hydrologie de surface, mais le couplage entre la modélisation fine des échanges nappe/rivière et les modèles de surface ne semble pas aisé.

3.5 Mise au point méthodologique et vérification de la qualité des données

L'étude bibliographique a montré que les torrents présentent des mécanismes de transport particuliers. Les fortes vitesses de transfert, les remous qui brassent violemment l'eau et les sédiments jusqu'au contact des berges, les taux élevés de M.E.S. sont autant de conditions particulières qui imposent un contrôle de la qualité des informations acquises.

3.5.1 Calibration des relations débit/hauteur.

Pour les deux crues échantillonnées sur le Boconó en amont de la confluence, des mesures simultanées de débit dans la station voisine de Las Cavitás ont permis de re-calibrer les courbes hauteur d'eau/débits sur les points de mesure.

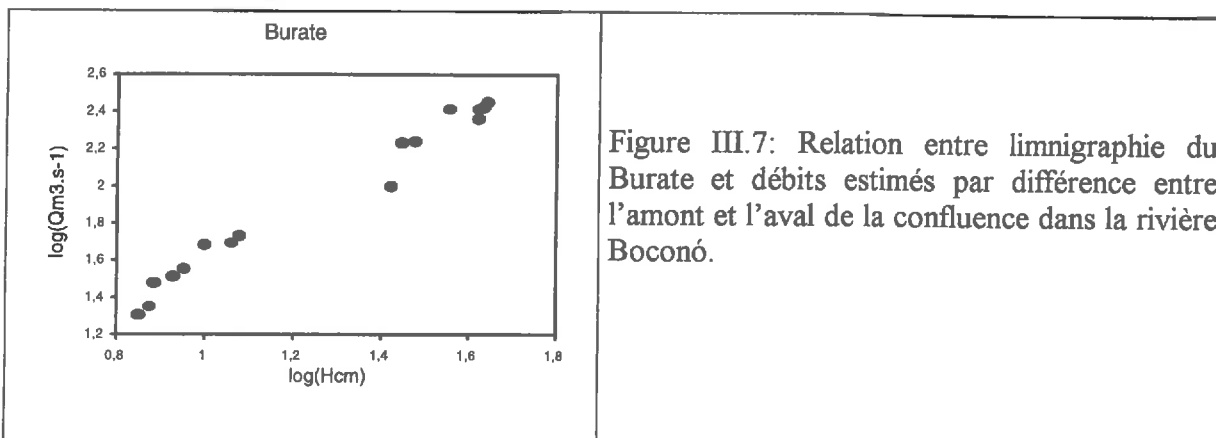


Figure III.7: Relation entre limnigraphie du Burate et débits estimés par différence entre l'amont et l'aval de la confluence dans la rivière Boconó.

Pour le Burate, l'opération s'est avérée plus délicate. Dans ce cas, l'écart temporel entre l'arrivée des crues du Burate et du Boconó à la confluence a été mise à profit. Lorsque la crue du Boconó survint, la décrue du Burate était largement amorcée et celle du torrent Corojó était terminée. Ainsi, en début de décrue du Boconó, la contribution du Burate était très faible. Il a été alors possible de calibrer la relation débit/hauteur d'eau dans le Boconó après la confluence. La différence de débits du Boconó entre l'amont et l'aval de la confluence lors de la crue du Burate a permis d'établir une calibration pour cette rivière juste avant la

confluence (Fig. III.7). Les résultats montrent une légère dispersion, mais qui ne devrait pas affecter significativement la qualité des estimations de débit.

3.5.2 Représentativité des prélèvements locaux dans la section du torrent

De part leur violence, les écoulements torrentiels produisent un brassage important de l'eau. La distribution habituellement parabolique des vitesses dans la section n'est plus vérifiée. Ces conditions seraient à *priori* favorables à une homogénéisation des caractéristiques physico-chimiques de l'eau au niveau transversal du torrent, ce qui accroîtrait la représentativité d'un prélèvement par rapport au flux moyen. Il paraît cependant important de vérifier la variabilité latérale des caractéristiques physico-chimiques dans une section.

Les conditions choisies sont les plus défavorables; il s'agit de l'exutoire, où la vitesse de l'eau est la plus faible du réseau et en période de fin de décrue. A ce niveau, le lit de la rivière est peu encaissé car il divague sur les alluvions. Il reçoit un torrent sur sa rive droite.

Dix points de prélèvements régulièrement répartis entre les deux berges (Fig. III.6) ont été échantillonnées en surface et en profondeur (80 cm.)

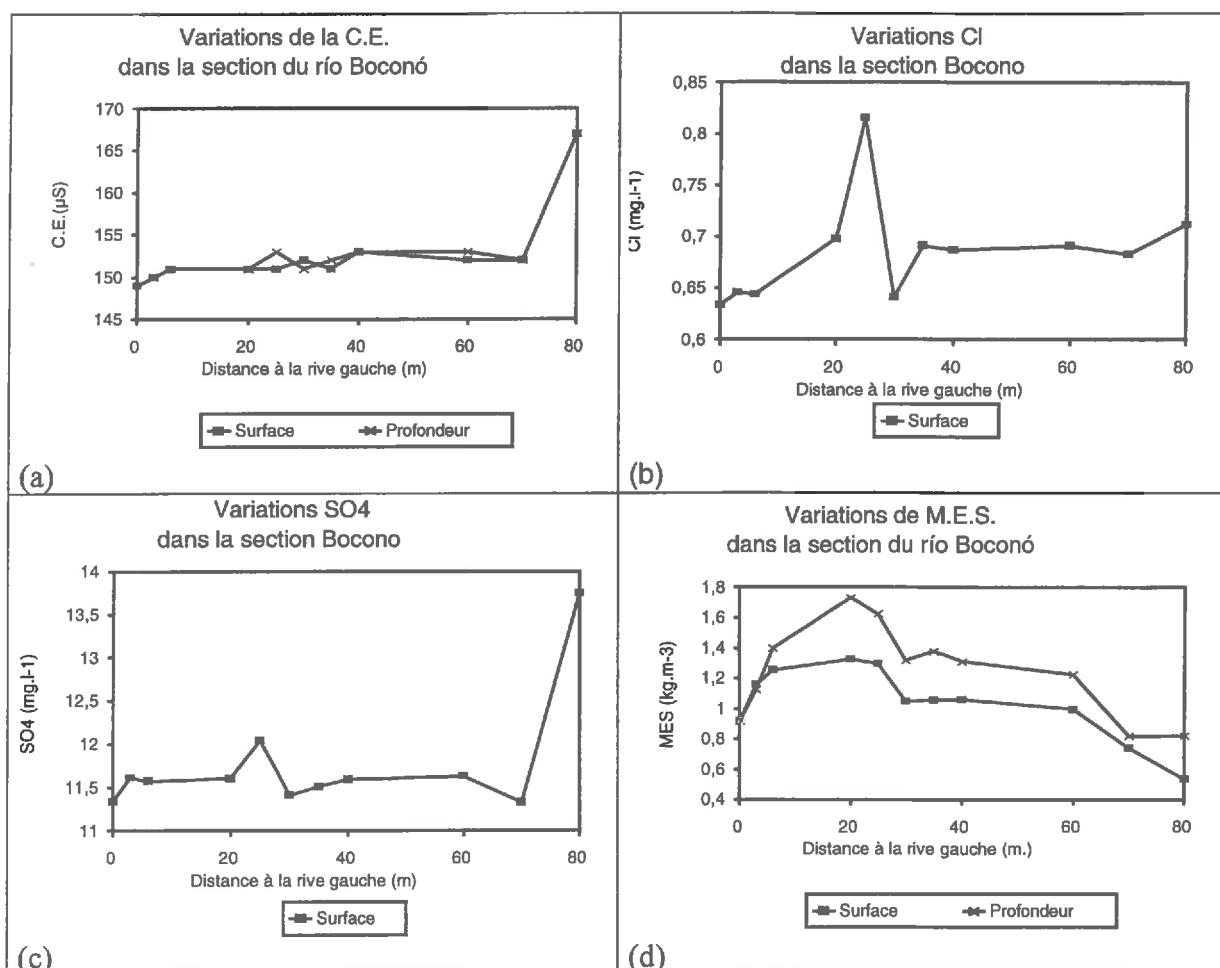


Figure III.8: Variations de la conductivité électrique (a), des teneurs en chlorure (b) et sulfate (c) ainsi que du taux de M.E.S. (d) dans la section du Río Boconó à l'exutoire le 17 juillet 1994.

Les résultats (Fig. III.8) montrent une forte homogénéité de la conductivité électrique, des chlorures et sulfates aussi bien latéralement que verticalement. Les variations de conductivité et de sulfate ponctuellement observés au contact de la rive droite sont liés à l'apport du torrent. La distribution spatiale des M.E.S. montre une certaine variabilité, très

faible au regard des variations temporelles observées sur cette crue (Chapitre V). La variabilité est corrélée à la morphologie de la section qui présente des chenaux. Le taux de M.E.S. est quelque peu plus fort en profondeur qu'en surface.

3.5.3 Répétabilité des mesures

Cette vérification a consisté à doubler les prélèvements temporels. A chaque moment, deux échantillons distants de quelques mètres ont été prélevés à des profondeurs légèrement différentes. La variabilité des résultats permet donc d'apprécier la somme des imprécisions liés à la représentativité de l'échantillon dans le flux (variabilité spatiale dans la section), les problèmes de contamination lors du conditionnement et de la préparation des échantillons au laboratoire (lors de la microfiltration notamment) et la répétabilité des dosages chimiques.

Etude de la répétabilité des mesures dans la partie amont du bassin

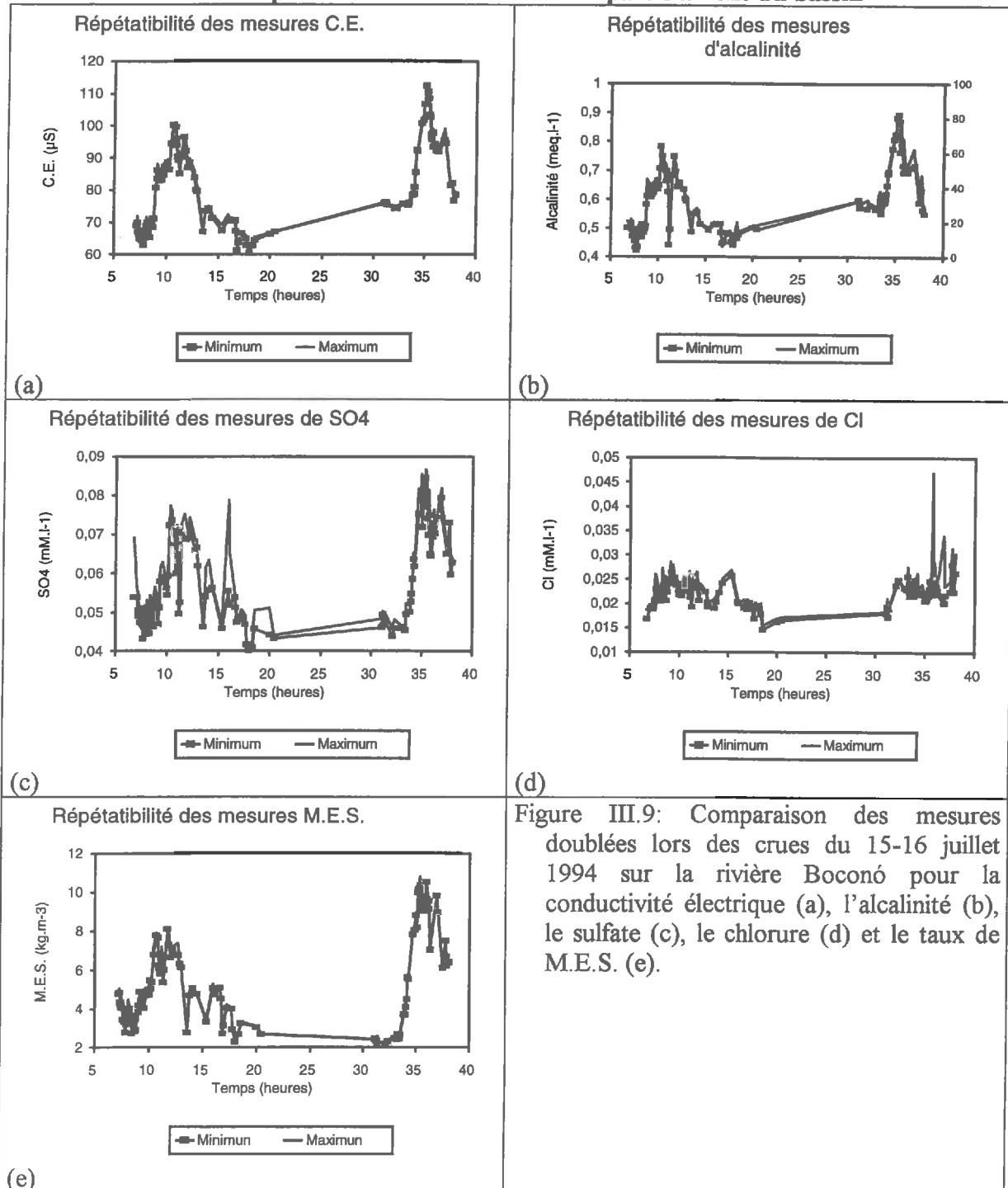


Figure III.9: Comparaison des mesures doublées lors des crues du 15-16 juillet 1994 sur la rivière Boconó pour la conductivité électrique (a), l'alcalinité (b), le sulfate (c), le chlorure (d) et le taux de M.E.S. (e).

Les résultats obtenus pour les 2x115 échantillons de la série B montrent une très bonne répétabilité des mesures (Fig. III.9). Les écarts entre répétitions sont de très loin inférieurs à la variabilité temporelle. Ceci assure une fiabilité certaine aux variations temporelles observées.

Etude de la répétabilité des mesures à l'exutoire du bassin

Simultanément aux prélèvements doubles présentés dans le paragraphe précédent pour le secteur amont, une série de répétition fut réalisée à l'exutoire pour la série A.

Ces répétitions ne furent pas systématique, mais limités à 50.

Les résultats obtenus (Figure III.10) conduisent aux mêmes remarques que pour la partie amont.

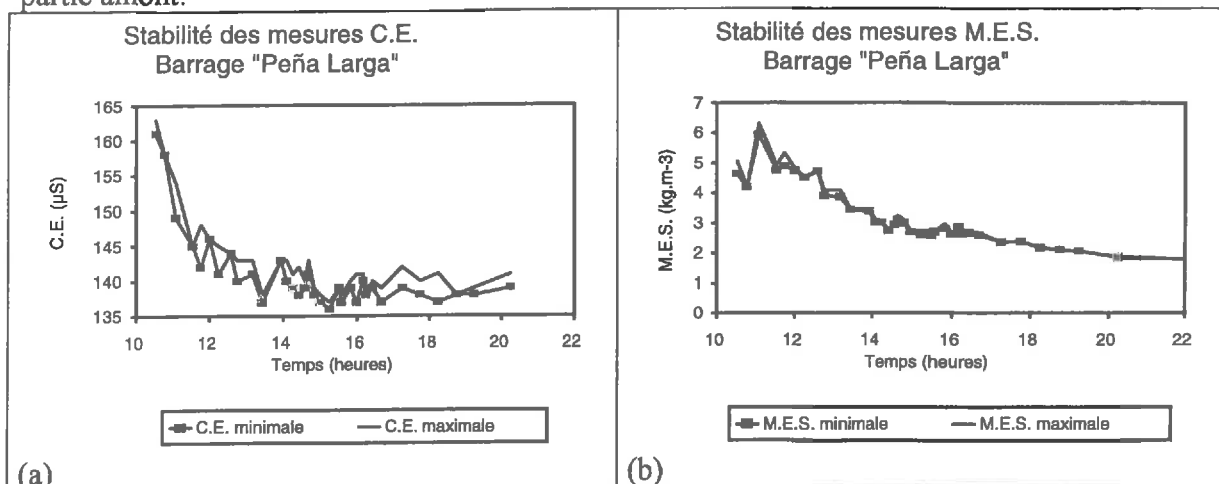


Figure III.10: Comparaison des mesures doublées lors des crues du 15-16 juillet 1994 à l'exutoire pour la conductivité électrique (a) et le taux de M.E.S. (b). Chaque figure comporte deux courbes enveloppées.

3.6 Conclusion sur le protocole expérimental

Bilan du dispositif:

La mise en oeuvre de ce dispositif a permis la collecte de 245 échantillons d'eau dans les différentes unités naturelles du bassin versant; ainsi que plusieurs campagnes de suivis des crues ayant totalisé 867 échantillons d'eau.

D'autre part, la collecte des échantillons de roches pour l'étude pétrographique ainsi que des sédiments (environ 100 échantillons au total) ont permis une connaissance plus fine de la lithologie présente dans le bassin.

Les prélèvements réalisés sur les horizons humifères et sur des litières et des végétaux doivent aider à définir les pôles organiques qui participent dans les taux de M.E.S.

D'autre part la démarche choisie pour cette étude avait pour objet une caractérisation assez précise d'un milieu mal connu au départ. Le dispositif utilisé devrait permettre de déceler tout d'abord les variations des caractéristiques chimiques des eaux lors des crues et de déterminer la répartition spatiale des signatures propres à chaque unité naturelle.

Les essais de répétitions des prélèvements lors des crues montrent que la variabilité de l'échantillonnage est largement inférieure aux variations temporelles, ce qui rend possible l'utilisation des traceurs et des marqueurs.

Cependant, pour que le traçage naturel soit utilisable, il faut que les différences entre les signatures des différents compartiments (verticales et latérales) soient suffisamment contrastées (Ribolzi *et al.*, 1996); ceci constituera l'objet principal du prochain chapitre.

CHAPITRE IV

SPATIALISATION DES CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES: DEFINITION DES UNITES HYDROLOGIQUES, CARACTERISATION DE LEURS SIGNATURES, IDENTIFICATION DES MARQUEURS ET DES TRACEURS.

Le bassin versant du Boconó présente des contrastes lithologiques, hydrologiques et pluviométriques assez remarquables (cf. Chapitre II). Comme il existe des grands ensembles spatialement structurés il convient de connaître leur signature chimique et isotopique. En outre, il semble indispensable d'identifier les éléments dissous et particuliers qui seront utilisés ultérieurement comme traceurs ou marqueurs pour l'étude de crues.

Ainsi, ce chapitre vise à caractériser ces unités fonctionnelles du bassin versant par leurs propriétés physico-chimiques. L'étude plus détaillée de ces paramètres permettra de définir les signatures chimiques et isotopiques propres à chaque unité et de définir les traceurs et marqueurs. La démarche retenue consistera, dans un premier temps à cartographier les concentrations des éléments dissous présents dans l'ensemble de la surface.

Après avoir étudié la distribution spatiale des caractéristiques physico-chimique des eaux et des phases solides, les mécanismes responsables de l'acquisition des signatures chimiques et isotopiques seront abordés. Enfin, l'identification des différents marqueurs et traceurs fera appel à la fois aux outils statistiques, géostatistiques et à la simulation thermodynamique des processus géochimiques.

4.1. Cartographie des caractéristiques chimiques et isotopiques des éléments dissous.

Pour réaliser cette cartographie, un échantillonnage a été effectué sur plus de 217 points constitués de cours d'eau et de sourcins sur l'ensemble du bassin versant. La figure IV.1 montre la distribution spatiale des points de prélèvements. Afin de vérifier la stabilité temporelle des informations spatiales, les deux sous bassins principaux ont été suivis pendant les périodes humides des années 1994 et 1995 et la saison sèche de 1994. Pour le massif de Guaramacal, les difficultés d'accès ont été considérables, ceci explique la basse densité de points sur cette zone.

Pour la signature $\delta^{18}\text{O}$, 10 stations pluviométriques ont été utilisées. Leur répartition est bien répartie sur la partie montagnarde du bassin versant (Figure IV.3)

4.1.1 Critères de choix des éléments

L'interprétation des cartes sera facilitée par l'utilisation des outils statistiques tels que la matrice des corrélations, l'A.C.P. et l'A.F.C. Ces outils permettent en particulier de regrouper les paramètres présentant un comportement voisin. Afin d'alléger ce mémoire, le traitement statistique est développé dans l'annexe I; seuls les points importants pour la suite seront repris ici.

Le premier plan factoriel, avec 65,1% de variance expliquée, sépare cinq groupes de paramètres chimiques. La matrice de corrélation de l'ACP montre de fortes corrélations positives entre la conductivité électrique, le pH, SO_4 , Al et Mg. Ce groupe est opposé à l'alcalinité carbonatée. Le sodium et le chlorure sont bien regroupés à part; tandis le nitrite a tendance à se rapprocher du triplet potassium, nitrate et phosphate.

Dans l'analyse factorielle de correspondance, le premier plan factoriel que représente 80% de la variance expliquée et montre l'existence de 3 à 4 familles d'eaux.

La distribution spatiale des éléments présentée ci-dessous a été réalisée après le calcul de variogrammes et correlogrammes. Ces derniers se regroupent en deux ensembles; le premier, constitué des paramètres conductivité électrique, sulfate, calcium, pH et aluminium présentent une portée de 4 à 4,5 Km. Le second groupe comprend les éléments tel que nitrate, nitrite, phosphate, potassium qui ont une portée inférieure, ce qui suggère une origine de la distribution spatiale différente du premier groupe.

AQUA Localisation des points de prélèvement

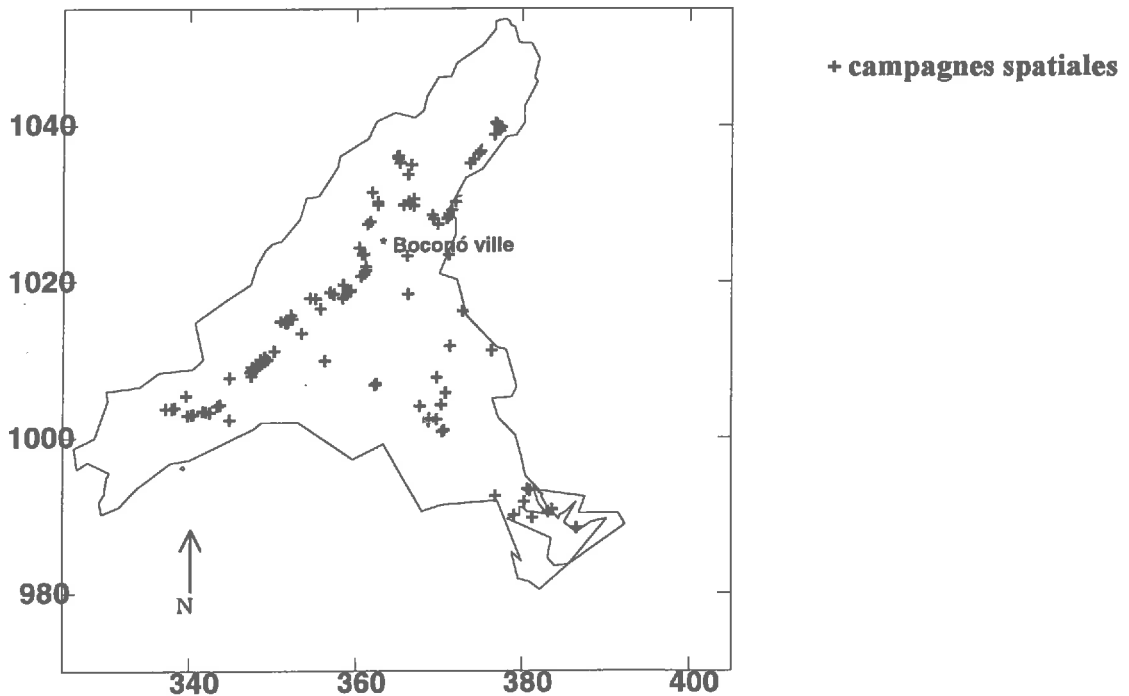


Figure IV.1: Carte de répartition des prélèvements d'eaux des campagnes spatiales pour l'analyse des éléments dissous.

4.1.2. La couple Na-Cl :

Ces deux éléments sont présents dans l'ensemble du bassin (fig. IV.2). Les concentrations en chlorure sont voisines à celle de la pluie (0-20 $\mu\text{M/l}$) sur l'essentiel de la surface 15-32 $\mu\text{M.l}^{-1}$; la même tendance peut s'observer pour le sodium (0-35 $\mu\text{M/l}$ dans les eaux de pluie).

Pour ces deux éléments les valeurs les plus élevées se localisent dans le sous bassin de San Miguel et plus ponctuellement à la confluence Boconó-Burate et à l'aval du bassin.

La distribution irrégulière de ces paramètres dans l'ensemble peut être attribuées à deux origines différentes. D'une part, et de manière générale, aux apports de la pluie; et d'autre part, à l'activité anthropique relativement importante dans le bassin de San Miguel et sur la branche Boconó et la présence d'une importante pisciculture localisées aux environs de la confluence Boconó-Burate qui place ses rejets directement à la rivière.

Pour le sodium un enrichissement produit par l'altération des minéraux sodiques (feldspath sodiques ou calcosodiques) est fort possible. Car l'essentiel de l'amont du bassin versant est constitué par ce matériau.

4.1.3. Le triplet: nitrate, potassium et phosphate.

La distribution géographique de ces trois éléments révèle des secteurs communs. Les valeurs élevées pour le nitrate et le potassium correspondent au sous bassin de San Miguel. La

distribution de potassium s'élargit en direction nord-centre du bassin, vers la confluence Boconó-Burate, ainsi que vers le versant nord de Guramacal et l'exutoire du bassin versant, c'est à dire le barrage. Pour les nitrates, la distribution est localisée sur la branche Boconó et haut Burate. En revanche, le phosphate est plus caractéristique du Burate.

Cette répartition des trois paramètres chimiques semble être liée à deux origines; la première concerne la minéralisation de la matière organique dans les zones de forte activité biologique comme les forêts présentes dans le centre et le sud du bassin et qui sont très denses. L'autre source peut être attribuée à l'utilisation de fertilisants riches en nitrates, potassium et phosphates nécessaires au maraîchage de façon secondaire aux grandes cultures pratiqués dans la vallée du Boconó et les versants cultivés de la branche du Burate.

Un autre mécanisme est susceptible d'enrichir l'eau en potassium est la libération de cet élément par les argilites du bassin de San Miguel et aussi dans quelques roches sédimentaires des torrents comme la Segovia, San Isidro ou Chandá.

4.1.4. Les Nitrites et la fugacité du gaz carbonique:

Les conditions de transports depuis le terrain jusqu'au laboratoire n'ont pas permis de reproduire des valeurs de concentration initiales fiables. Les eaux n'ayant pas été empoisonnées au $HgCl_2$, l'activité microbienne a probablement consommé une partie de nitrates produisant du nitrite. Aussi, ces valeurs doivent être prises comme des ordres de grandeur pour les nitrates et nitrites.

La fugacité du gaz carbonique (pCO_2) a été calculée à partir des valeurs de pH du terrain et d'alcalinité dosée au laboratoire.

La distribution spatiale de ces paramètres laisse apparaître qu'ils ne sont pas présents sur toute la surface du bassin. Ainsi, ils sont restreints aux deux hauts bassins principaux pour le nitrite, comme par le secteur du versant nord du Guramacal et l'entrée du Boconó au barrage.

En opposition à la distribution du nitrate, il faut remarquer l'absence de nitrites dans le sous bassin de San Miguel. Ceci montre l'absence de processus de réduction biologique des nitrates dans cette partie du bassin. En revanche, la présence de nitrites dans les secteurs mentionnés plus haut doivent être reliées aux processus de réduction développés dans les secteurs très humides et peu oxygène et plus particulièrement dans les vallées des río Azul et río Negro. Ce mécanisme se retrouve à la confluence río Azul et Blanco dans le haut Boconó et les zones d'accumulation de sédiments à l'embouchure du Boconó dans le barrage.

La pCO_2 forte est le résultat de processus de réduction qui piègent le gaz carbonique entraînant ainsi une diminution de l'oxygène. Les valeurs plus élevées se retrouvent dans le barrage ceci semble être cohérent en prenant en compte les sérieux problèmes d'ensablement subit par le barrage.

Une pCO_2 faible montre, en revanche, des eaux très aérées. Ceci montre la torrencialité des écoulements caractéristiques des branches Boconó et Burate en amont.

4.1.5. L'alcalinité carbonatée:

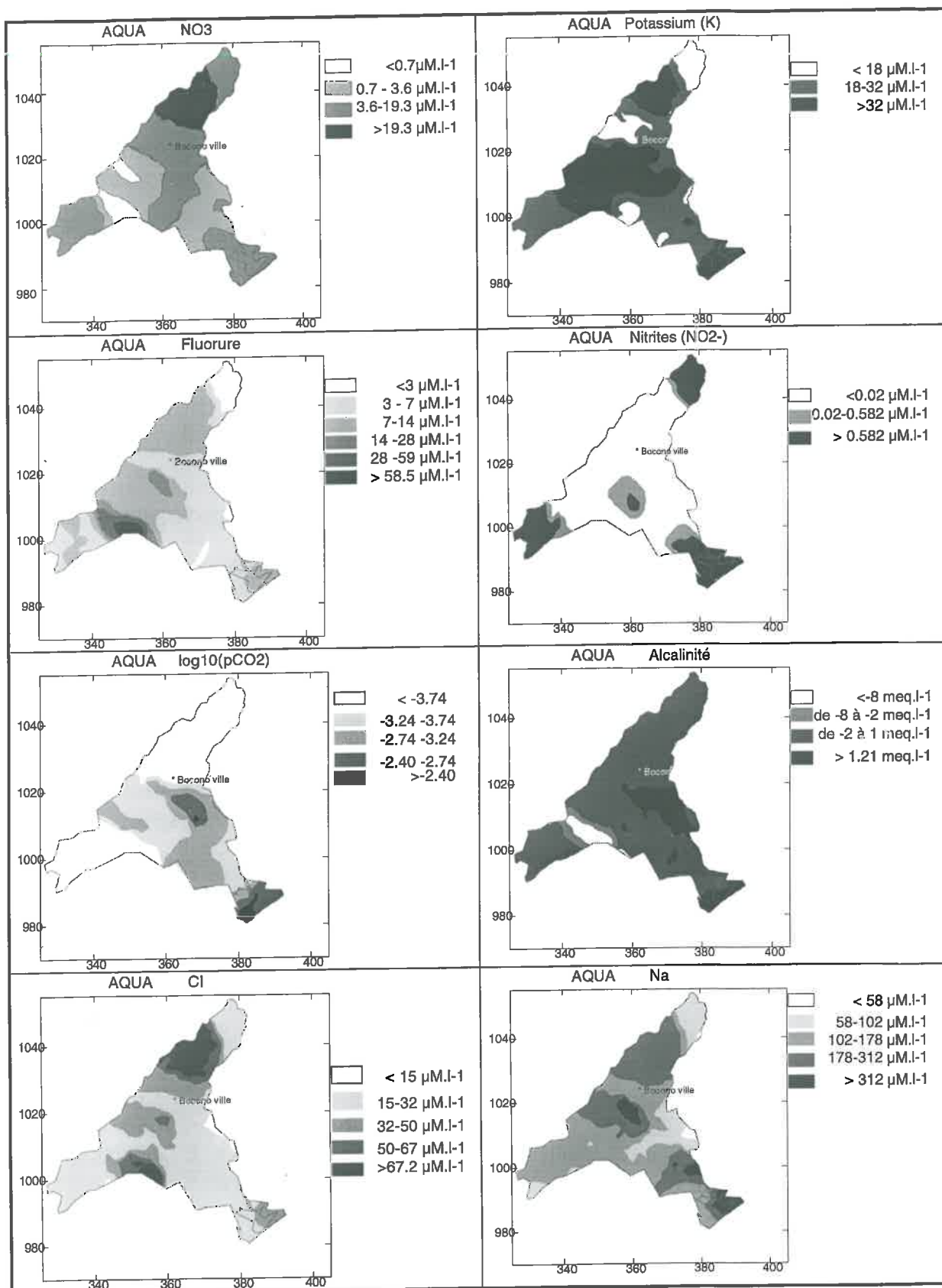
Ce paramètre montre une répartition très hétérogène dans l'ensemble du bassin. Le substrat lithologique est le responsable de cette variabilité. Une grande partie du bassin est dominé par des eaux très diluées et alcalines. Elles caractérisent surtout les zones de roches cristallines qui se dégradent très lentement dû aux températures fraîches. Il faut signaler que l'alcalinité essentiellement représentée par HCO_3^- (bicarbonates) est l'anion majeur.

Ensuite un secteur constitué par des roches sédimentaires et volcanoclastiques se dissolvent plus vite en présence de températures plus chaudes en libérant ainsi plus d'alcalinité.

Enfin, le secteur Vitisay, sur la branche moyenne du Burate, où les valeurs d'alcalinité sont négatives est marqué par la présence de lutites pyriteuses qui produisent de l'acidité.

La localisation de l'alcalinité dans le plan factoriel de l'ACP est opposée aux groupes sulfate, pH, aluminium et calcium. Ceci peut être expliqué par l'opposition entre 2 grandes

familles d'eau, celles à forte teneurs en sulfate (eaux du secteur Vitisay) et les eaux de zones de roches granitiques et des formations non pyriteuses .



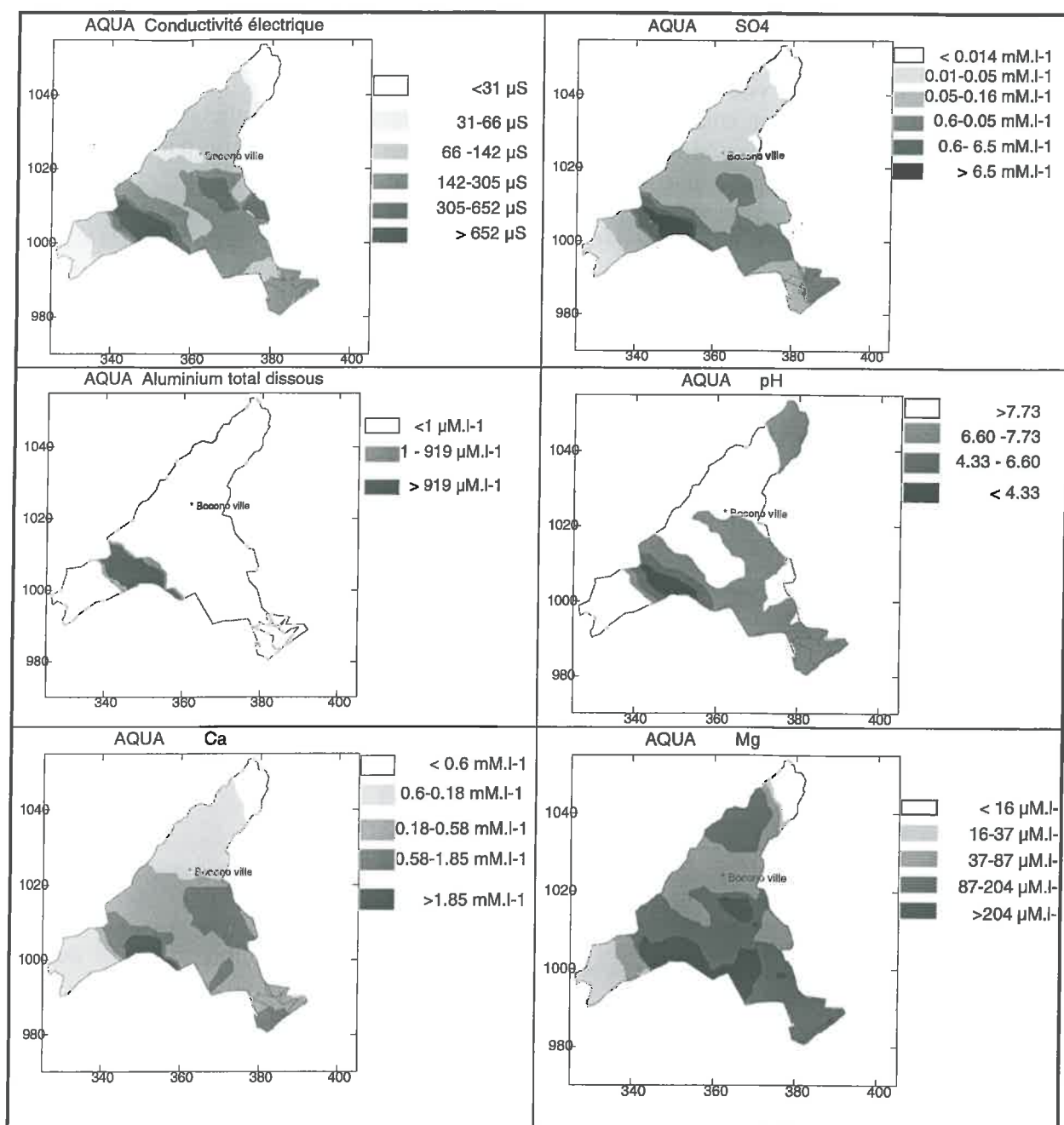


Figure IV.2: Distribution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux dans le bassin versant du río Boconó. Cartes réalisées par krigeage à partir de toutes les données des campagnes spatiales de prélèvements.

4.1.6. Le groupe de la conductivité électrique, le sulfate le calcium, le pH, l'aluminium et le magnésium:

L'existence de ce groupe important et bien individualisé dans les différents traitements statistiques et géostatistiques montre la forte corrélation entre les paramètres et l'homogénéité de leur répartition spatiale.

En effet, la distribution de la concentration de ces éléments dans le bassin est assez hétérogène et structurée. Elle est liée à la lithologie. Les valeurs les plus élevées de ces six paramètres se localisent dans le secteur de Vitisay (lutites pyriteuses). L'alcalinité y est négative, le pH peut atteindre jusqu'à 2,3 ce qui coïncide avec les plus fortes valeurs en aluminium, calcium et magnésium.

Contrairement à cette zone de fortes concentrations, se trouvent les secteurs de formations cristallines présentant les concentrations les plus faibles de ces éléments. Il s'agit en particulier des hautes vallées des río Boconó et Burate.

Les fortes teneur en calcium, magnésium et d'alcalinité observés dans les quebradas Chandá, Segovia et San Isidro (versant nord du Guaramacal), peut s'interpréter par la présence des roches charbonneuses qui contiennent du sulfure mais en moindre quantité que celles du secteur Vitisay; ce qui ne permet pas de produire une acidité aussi importante. L'alcalinité et le calcium sont assez abondants ce qui suggère l'existence de calcite dans ce terrain sédimentaire. Par ailleurs, l'étude de terrain a permis de confirmer la présence de calcaire dans le massif de Guaramacal.

Les situations intermédiaires correspondent aux formations sédimentaires, autres que celle des lutites pyriteuses, où les teneurs sont modérées. Il existe un enrichissement en calcium et magnésium très probablement associé à l'existence des roches volcanoclastiques abondantes dans quebradas el Toro et Cafenol (sous bassin du Boconó) et Escurufiní et Escundrun localisées dans le secteur du río Burate.

4.1.7. ^{18}O des pluies et des cours d'eau.

La figure IV.3 représente les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de pluies pour l'ensemble du bassin de la période du 3 au 19 juillet 1995.

Les valeurs les moins négatives concernent la partie aval, le centre-est du bassin et le haut Boconó; suivi de valeurs intermédiaires qui dominent la branche Boconó.

Les valeurs les plus négatives sont nettement centrées sur le sous bassin de Burate, ceci coïncide avec l'effet d'altitude sur la répartition de la pluie dans le bassin. Il est possible d'observer dans le sous bassin de San Miguel et aux environs du «páramo la Cristalina», c'est effet altitudinel sur la pluie.

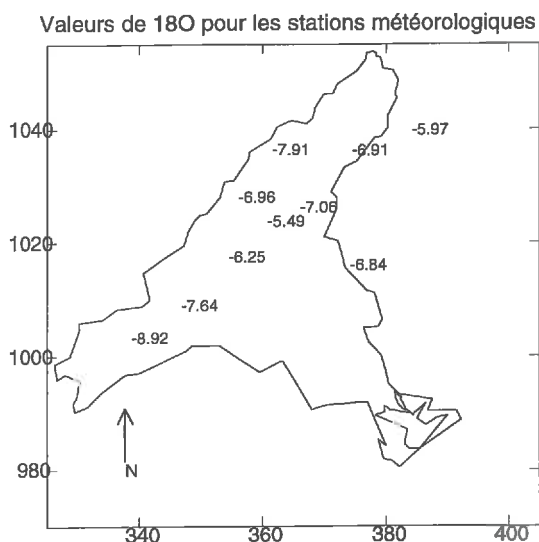


Figure IV.3: Distribution du $\delta^{18}\text{O}$ des pluies dans le bassin versant du río Boconó.

4.1.8. Caractérisation de la matière organique: le taux de C.O.P., le rapport C/N et le $\delta^{13}\text{C}$.

Les prélèvements réalisés sur des lutites, sur des feuilles d'espèces forestières, cultivées ou des zones inondables, ainsi que sur des litières ou des sédiments de divers affluents de l'amont du bassin ont été analysés. Les résultats ont permis de déterminer des pôles dont les caractéristiques ont été résumées dans le tableau IV.1.

Le premier pôle est représenté par les lutites pyriteuses du secteur Vitisay avec un $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -24 et -25 et les roches charbonneuses plus dures et moins pyriteuses localisées dans les quebradas Chandá et Segovia $\delta^{13}\text{C}=-28$.

Le pôle de cultures du type C4 telles que canne à sucre et le maïs localisées dans la vallée du Boconó et cultivées sur les versants du Burate se distinguent par des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus lourds entre -10 et -14,5.

Enfin, le pôle de $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -32,0 et -29 correspondant à la forêt sempervirente qui couvre le sous bassin de Boconó et la partie centrale du bassin. Cette valeur très négative s'explique par le fort taux de recyclage interne dans les forêts tropicales denses.

Le rapport C/N est en relation avec le degré d'humification du matériel. Les feuilles et brindilles se caractérisant par des rapports C/N élevés, voisins de 30-40. Dans les humus évolués, le rapport C/N se stabilise entre 10 et 12; ceci coïncide avec les valeurs rapportés dans la littérature. (Duchaufour, 1978)

Tableau IV.1
Valeurs caractéristiques de divers pôles pour la matière organique moyennes réalisées sur plusieurs échantillons du bassin versant pour chacun des pôles

$\delta^{13}\text{C}$	C/N	Teneur C (mgC/g)	Pôles
-25,4	12,8	18,4	Lutites pyriteuses
-28,1	30,1	16,4	Roche carbonneuse
-14,4	12,8	1,6	Humus sous Culture C4
-26,7	21,4	200,0	Végétal Forêt (C3)
-29,8	63,0	356,2	Végétal Forêt (C3)

La figure IV.4, représente la distribution spatiale de $\delta^{13}\text{C}$ sur des sédiments, des végétaux et des litières de la partie amont du bassin.

Distribution de ^{13}C dans le bassin versant du río Boconó

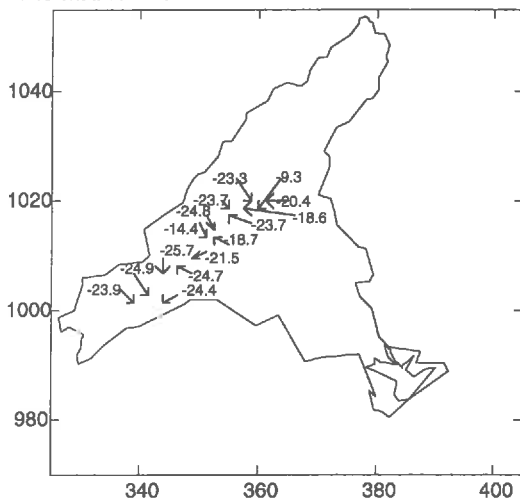


Figure IV.4: Spatialisation du $\delta^{13}\text{C}$ réalisées sur des sédiments et végétaux des différentes cours d'eau dans le bassin versant du río Boconó.

L'examen de la carte montre que comme pour l'oxygène 18, les lois de répartition du carbone 13, du rapport C/N ou de l'azote ne sont pas forcément liées à la position dans le paysage ou à la lithologie. La répartition spatiale du $\delta^{13}\text{C}$ et du C/N présente des variations marquées sur des distances plus faibles que pour la chimie des eaux. Elle est essentiellement liée au type de végétation et donc indirectement au climat. Les mécanismes responsables des différents types de matières organique sera abordée dans le prochain paragraphe.

4.2 Etude et simulation des processus d'acquisition des signatures chimiques et isotopique

Cette seconde partie du chapitre vise à étudier les mécanismes responsables des signatures chimiques et isotopiques des différentes unités. En effet, cette compréhension permettra d'extrapoler avec moins de risques les informations forcément ponctuelles acquises sur les différents réservoirs.

Dans un premier temps, il sera fait appel aux modèles d'équilibre solution/minéraux pour déterminer quelques minéraux et mécanismes d'altération responsables des caractéristiques observées.

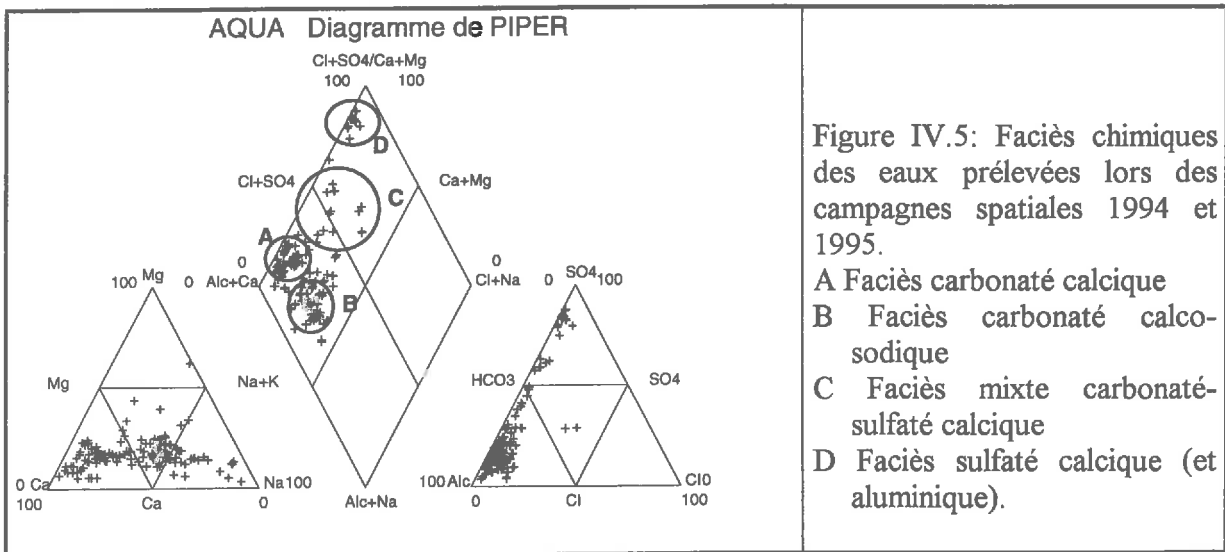
Dans un deuxième temps, ces groupes de minéraux seront introduits dans des modèles de simulation des interactions solution/minéraux afin de vérifier si les mécanismes invoqués sont capables d'expliquer les concentrations observées. Il sera alors possible de tester l'influence de différents facteurs physico-chimiques sur les concentrations observées.

La représentation synoptique du faciès chimique des eaux du bassin réalisée grâce au diagramme de Piper (Figure IV.5) confirme la forte variabilité du faciès chimique et montre l'existence de divers groupes correspondant aux différents bassins mentionnés par l'étude spatiale.

Compte tenu des résultats obtenus dans l'étude de la répartition spatiale des caractéristiques chimiques des eaux, les faciès et mécanismes étudiés seront:

- l'altération des roches cristallines et l'acquisition du faciès alcalin des eaux peu diluées.
- l'altération des la pyrite en présence de silicates d'aluminium et l'acquisition du faciès sulfaté acide et aluminique des solutions de sols sur schistes pyriteux
- la réduction des eaux d'imbibition des sédiments du barrage et la solubilisation des minéraux ferreux.

De même, les mécanismes responsables de la distribution spatiale de $\delta^{18}\text{O}$ des pluies et de $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique seront abordés dans ce paragraphe.



4.2.1 Etude des équilibres entre solution et minéraux

A partir des données analytiques, les activités ioniques ont été calculées avec AQUA (Vallès et De Cockborne, 1992), ce qui permet d'appréhender l'état d'équilibre des solutions avec divers minéraux.

Les résultats (Fig. IV.6) montrent que les eaux sont généralement diluées et loin de l'équilibre avec le gypse. L'état d'équilibre avec ce minéral n'est atteint que par quelques échantillons sulfatés prélevés dans le secteur Vitisay, riche en lutites pyriteuses.

L'équilibre avec la calcite n'est pas toujours atteint. Il convient de remarquer en particulier que lors de son entrée dans le barrage, les eaux du Boconó sont chargées en CO₂ (log₁₀(pCO₂) voisin de -1,0) et proches de l'équilibre avec la calcite. Il en va de même pour les échantillons des sous bassins de Chandá, Segovia et de la partie ouest de Corojó.

Ces fortes valeurs de pCO₂ traduisent la conjonction de deux phénomènes: forte activité biologique et sol engorgé réduisant les transferts gazeux, ce qui induit une asphyxie marquée dans les sédiments de barrage. Pour l'ensemble des autres échantillons, la pCO₂ est très faible et voisine de celle de l'atmosphère (log₁₀ (pCO₂) = -3,5). Ces valeurs reflètent la forte aération des eaux et montrent la puissante agitation de l'eau dans ces écoulements torrentiels.

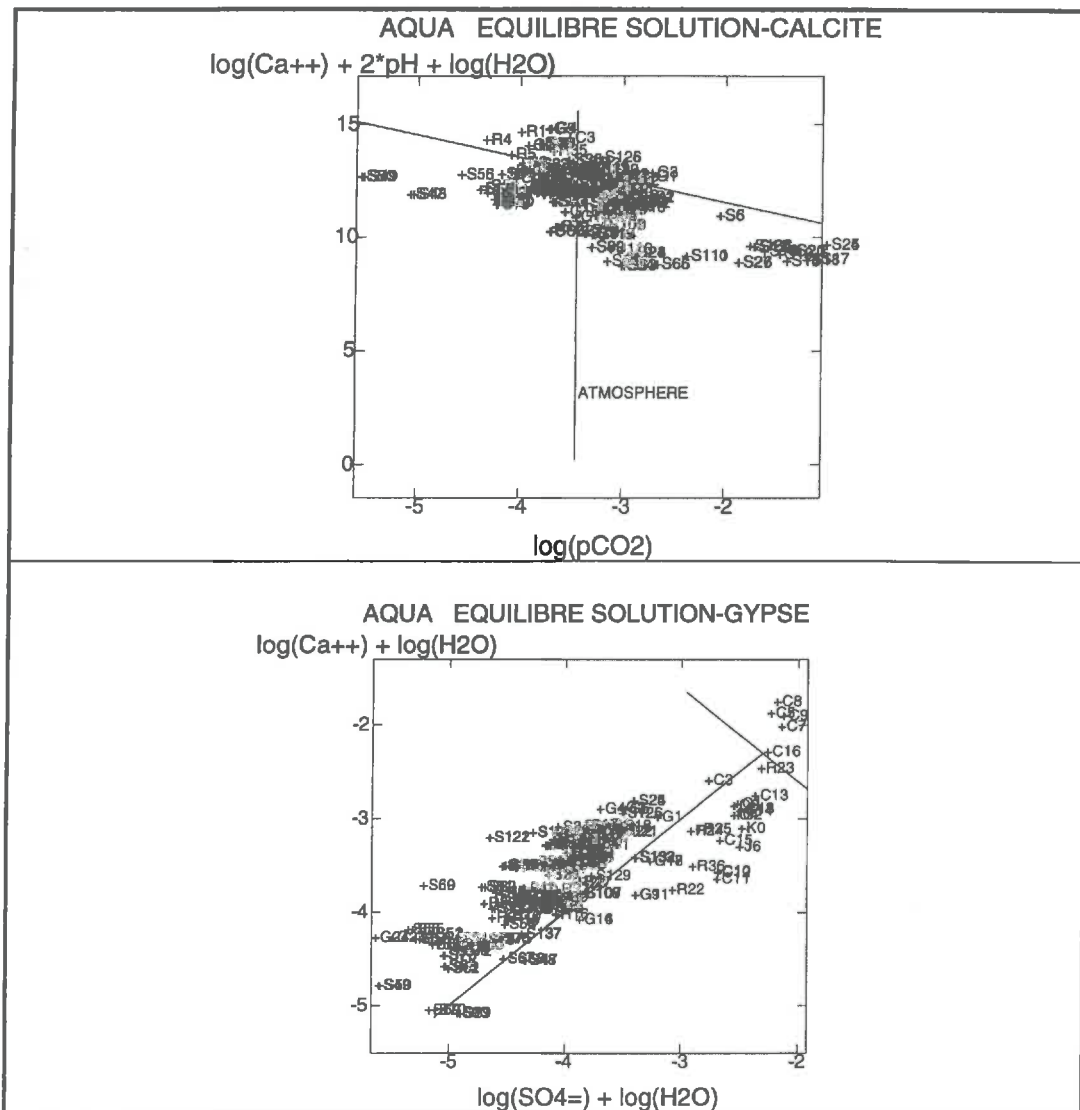


Figure IV.6: Diagramme d'équilibre des eaux de la campagne de spatialisation avec la calcite et le gypse.

4.2.2 Altération des roches cristallines et alcalinisation

En l'absence d'analyse des teneurs en silice dissoute, l'étude des équilibres entre les solutions issues de haute montagne et les silicates d'aluminium se résumera en des comparaisons entre données analytiques et les simulations d'altération de feldspaths sur les

autres éléments majeurs seulement. L'étude des équilibres solutions/minéraux ne peut être réalisée à partir des analyses d'eau d'où le recours à la simulation.

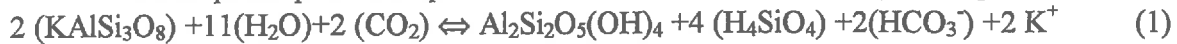
La dissolution d'un mélange de feldspaths sodique, potassique et calcique, ainsi que de quartz a été simulée. Les quantités de feldspaths utilisées ont été inspirées des travaux de Gac, (1980) et figurent dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2:
Composition chimique et quantités de feldspaths utilisées pour la simulation.

Minéral	Composition chimique	Quantité (mM.l ⁻¹)
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	0,120
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0,088
Microcline	KAlSi ₃ O ₈	0,022

Les valeurs obtenues corroborent des résultats déjà connus par la littérature. La dissolution des feldspaths libère des cations alcalins ou alcalino terreux ainsi que de la silice et de l'aluminium. L'essentiel de l'aluminium et une partie de la silice libérés précipitent sous forme de kaolinite et d'illite. Ceci conduit à une augmentation d'alcalinité qui en présence du CO₂ s'exprime sous forme de HCO₃⁻. La réaction consomme donc du CO₂ et appauvrit la solution du sol en CO₂. Ceci permet d'expliquer les log(pCO₂) < -3,5 observées sur les secteurs amont de Burate et Boconó

Si l'on prend pour exemple le cas du microcline, la réaction globale peut s'écrire:



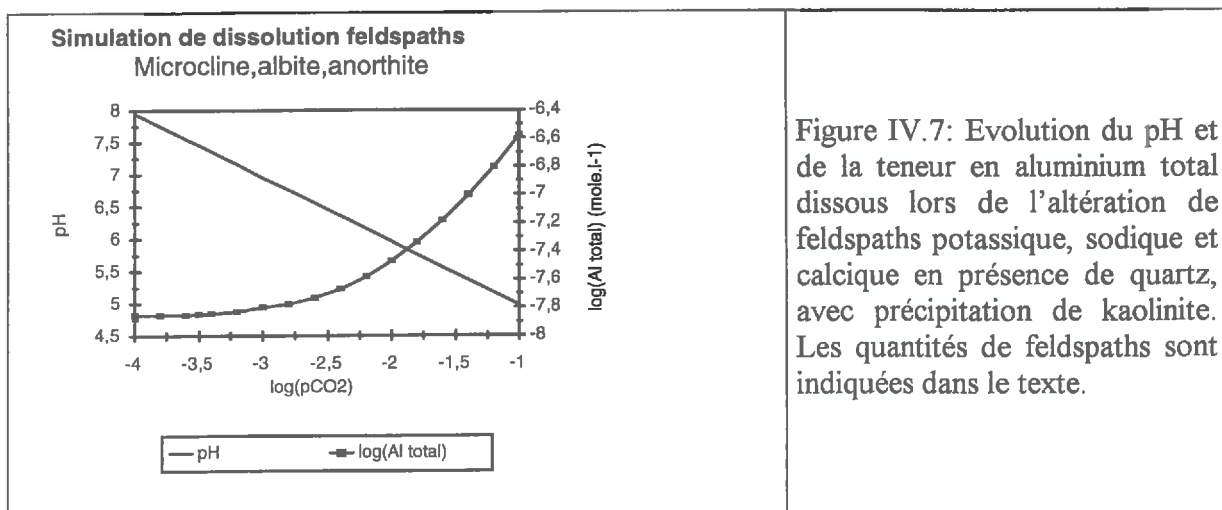
Microcline + eau + CO₂ ⇌ Kaolinite + Silice dissoute + bicarbonate + potassium

Les simulations indiquent des concentrations globales de l'ordre de la mM.l⁻¹, voire moins, ce qui est faible mais suffisant pour atteindre l'équilibre avec le feldspath potassique par exemple.

L'anion majeur est HCO₃⁻, principal représentant de l'alcalinité.

Les teneurs totales en aluminium dissous varient selon la pCO₂ (fig.IV.7), mais demeurent très faibles, dans la fourchette 10⁻⁸ et 10⁻⁶ mole/l. Dans une large gamme d'aération, le pH est voisin de la neutralité ou légèrement acide. Pour tous ces paramètres, les ordres de grandeurs correspondent bien avec les caractéristiques observées sur le terrain pour les eaux issues des roches cristallines.

En résumé, la faible teneur en éléments dissous, la très faible teneur en aluminium et la réserve alcaline caractérisent ces eaux.



4.2.3 Oxydation de la pyrite et acidification

Les conséquences de l'oxydation de la pyrite sur l'acidification des sols a fait l'objet de nombreuses études dans le cadre des sols sulfatés acides de mangrove, donc en milieu tropical très chaud, généralement deltaïque et dans des paysages plats (Marius et Lucas, 1982; Marius, 1984).

Le contexte étudié ici est très différent et il convient donc d'étudier les processus réellement impliqués dans ce cadre montagnard.

4.2.3.1 Etude des équilibres solutions minéraux et caractérisation chimique fine des eaux acides

Les analyses d'éléments majeurs, des terres rares, avec le pH et la conductivité électrique se trouvent dans l'annexe III; seules quelques considérations générales seront présentées ici.

En milieu acide, la solubilité des métaux est importante. Lorsque le pH devient particulièrement bas, une solubilisation de l'aluminium conduit généralement à des processus de toxicité aluminique qui réduisent la croissance des végétaux. Dans le cas des sols se développant sur les lutites pyriteuses, l'acidité et la toxicité aluminique sont telles que la couverture végétale peut disparaître, exposant ainsi le sol à l'action érosive des pluies tropicales.

Dans ce paragraphe, l'impact de l'acidité sur la solubilisation des éléments, en particulier métalliques, sera esquissée.

Dans l'annexe (III) les analyses chimiques réalisées par ICP, ICP-MS montrent de fortes teneurs en Aluminium, ce qui confirme le caractère toxique de ces eaux. Les teneurs en fer dissous sont elles mêmes très élevées. Ce résultat est lié à l'acidité mais aussi à l'origine réductrice des eaux qui circulent dans les lutites riches en carbone organique et en pyrite. Les traits marquant sont les fortes teneurs en cuivre, zinc, cadmium, thorium et uranium. les trois premiers éléments accentuent le caractère toxique de ces eaux pour les plantes.

L'étude fine des processus géochimiques affectant la concentration des éléments traces, bien que très intéressante par elle-même, s'éloigne des objectifs recherchés dans ce travail. Elle fera donc l'objet de l'annexe III et d'une étude séparée. Seule l'étude des éléments majeurs va être développée.

4.2.3.2 Simulation de l'oxydation de la pyrite

Dissolution dans l'eau pure avec ou sans gaz carbonique: étude de la source d'acidité.

La dissolution de la pyrite dans de l'eau pure a été simulée dans deux contextes différents, à savoir en présence ou en l'absence de CO₂ (figure IV.8).

Dans les conditions oxydantes et moyennement réductrices, la dissolution libre du soufre qui s'oxyde sous forme de sulfate.

L'équation globale peut s'écrire:



Pyrite + eau \Leftrightarrow fer + sulfate + 16 fonctions acides + 14 électrons

La production d'acidité est telle que, mis à part pour les conditions réductrices avec Eh < -0.1 V, l'effet de la dissolution de CO₂ sur la baisse pH est tout à fait négligeable.

Dans les conditions réductrices, le pH dépend de la dissolution de CO₂, mais ceci n'affecte pas la réserve alcaline ou acide de la solution. Tout au plus note-t-on un léger effet sur la dissolution de la pyrite.

Les pH obtenus dans les conditions plus ou moins oxydantes sont très acides et les concentrations en sulfates dépassent rapidement la millimole/l. Le fer libéré par la dissolution de pyrite s'accumule en solution. En effet, lorsque les conditions deviennent oxydantes, le rapport Fe^{3+}/Fe^{2+} augmente, ce qui favorise la précipitation d'oxydes et hydroxydes ferriques moins solubles que les formes ferreuses. Cependant, la baisse concomitante du pH lorsque le milieu devient plus oxydant retarde cette précipitation. En effet, les oxydes de fer comme les autres oxydes sont plus solubles en milieu acide:



La conséquence est une forte solubilisation du fer, ce résultat est conforme aux données analytiques obtenues sur les échantillons des zones acides: puisque les molalités en SO_4 et Fe dosées atteignent respectivement $3,67 \cdot 10^{-3} M.l^{-1}$ et $9,33 \cdot 10^{-3} M.l^{-1}$.

Dissolution de pyrite en présence de silicate d'aluminium: étude de la dynamique de l'aluminium

La même simulation a été réalisée en supposant la présence d'un stock non épuisable de kaolinite. Les résultats (fig. IV.8) montrent que l'acidité produite provoque l'acidolyse du silicate, libérant silice et aluminium.



Kaolinite + fonctions acides \Leftrightarrow aluminium + silice aqueuse + eau

Cette attaque consomme de l'acidité, ce qui relance la dissolution de la pyrite. Mis à part une légère atténuation du caractère acide des eaux, le résultat global est une augmentation de la quantité de pyrite solubilisée et une solubilisation importante de l'aluminium.

Les valeurs d'aluminium dissous prévus par le modèle sont considérables et atteignent aisément la $mM.l^{-1}$. Ceci est conforme aux résultats obtenus sur les solutions du secteur Vitisay qui atteignent facilement 15 à 20 $mM.l^{-1}$ d'aluminium et 140 $mM.l^{-1}$ de sulfate.

La simulation indique par ailleurs la formation de sulfate d'aluminium, de type $AlSO_4(OH)$ à partir de $Eh = +0,15$ V environ. Bien que la stoechiométrie exacte des gels d'aluminium n'ait pu être déterminée, la précipitation de sulfates d'aluminium, parfois abondante, a été constatée sur le terrain.

Des calculs similaires ont été réalisés en supposant la présence d'autres silicates et en particulier des feldspaths. Les résultats obtenus ne sont pas présentés ici, mais vont dans le même sens que ceux présentés pour la kaolinite. Ils indiquent que les feldspaths sont attaqués par l'acidité de façon plus violente encore que la kaolinite; ils seront altérés et éliminés plus rapidement du profil que la kaolinite. Leur dissolution libère des cations alcalins et alcalino-terreux en quantité vers la solution, ce qui est conforme aux analyses réalisées pour le secteur Vitisay.

Dissolution de pyrite en présence de calcite: étude de la neutralisation en présence de roches calcaire (Chandá et Segovia)

Une simulation a été réalisée en supposant la présence d'une quantité modérée de calcite ($CaCO_3$). Les résultats montrent que l'acidification est atténuée (Fig. IV.8), plus particulièrement pour les conditions peu oxydantes. La modélisation montre que l'atténuation du pH favorise la précipitation d'oxydes ferriques conformément à la réaction (3). La précipitation de gypse devient possible notamment pour des Eh positifs, mais quelque soit le Eh, les quantités de gypse susceptibles d'être formé sont limitées. Ce résultat est conforme à l'étude de l'équilibre des eaux avec le gypse réalisée sur les données spatiales, qui montre que cet équilibre est effectivement atteint pour plusieurs échantillons issus de la zone d'altération des lutites pyriteuses (§4.2.1).

En conclusion de ces simulations de l'oxydation de la pyrite, il ressort que ce mécanisme induit une forte dissolution de sulfate, du fer et de l'aluminium et l'acquisition d'un caractère acide très marqué. Les silicates d'aluminium sont attaqués, en premier les feldspaths puis les argiles de type kaolinite. Les minéraux résiduels sont essentiellement le quartz peu soluble en milieu acide (surtout à basse température). Ceci conduit à la formation d'horizon de faible stabilité structurale et donc facilement érodable. La toxicité aluminique élevée de ce milieu interdit toute végétation, ce qui expose les sols aux averses et aggrave le processus d'érosion. Lorsque des minéraux alcalins sont présents, une partie de l'acidité est neutralisée l'eau est riche en cation comme en sulfate. C'est le cas des eaux du secteur Chandá, Segovia et partie ouest de Corojó(Corojó *sensu stricto*), où la production d'acide sulfurique, plus localisée que dans le secteur Vitisay, est en majeure partie neutralisée donnant des eaux sulfatées mais riches en cations alcalino terreux.

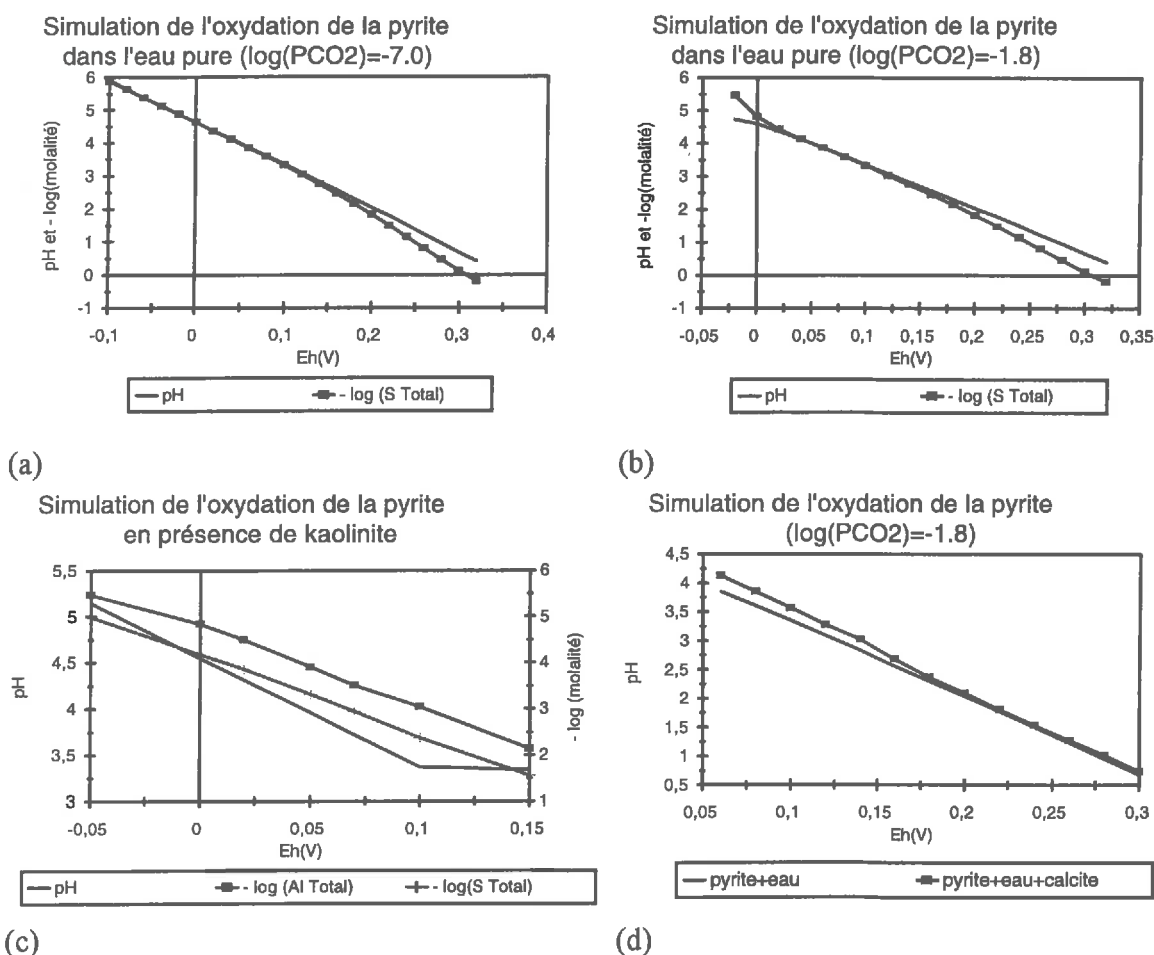


Figure IV.8: Résultats de simulation de l'altération de la pyrite dans divers environnements minéralogiques et pressions partielles en CO_2 . Eau pure (a) et (b), eau + kaolinite (c), eau + calcite (d).

4.2.4 Simulation de la réduction de l'eau du Boconó dans les sédiments du barrage

Les sédiments sableux et meubles du barrage sont très poreux. Ils constituent un réservoir important qui emmagasine une nappe susceptible de réagir avec le rio Boconó dans la fin de son parcours. Les observations réalisées sur le site ont montré des processus de réduction très poussés dissolvant le fer de façon spectaculaire, sur l'ensemble des zones de dépôt du barrage.

Il paraît donc utile d'étudier sommairement l'impact de ces processus de réduction sur le faciès chimique des eaux afin d'en déduire des indicateurs d'une contribution éventuelle de la nappe aux écoulements du río Boconó dans la partie terminale de son cours.

Les calculs se dérouleront en deux étapes. La première sera consacré au calcul des variations verticales de la pression partielle en oxygène à partir des profils de mesures pH, Eh et température réalisées sur le terrain. La seconde permettra de prévoir par simulation l'impact de ces processus sur les caractéristiques des eaux de nappe à l'exutoire.

Calcul des variations verticales de la pression partielle en oxygène

Des mesures de pH, Eh et température ont été réalisées dans un profil d'alluvions récentes le 12 juillet 1995 (fig. IV.10).

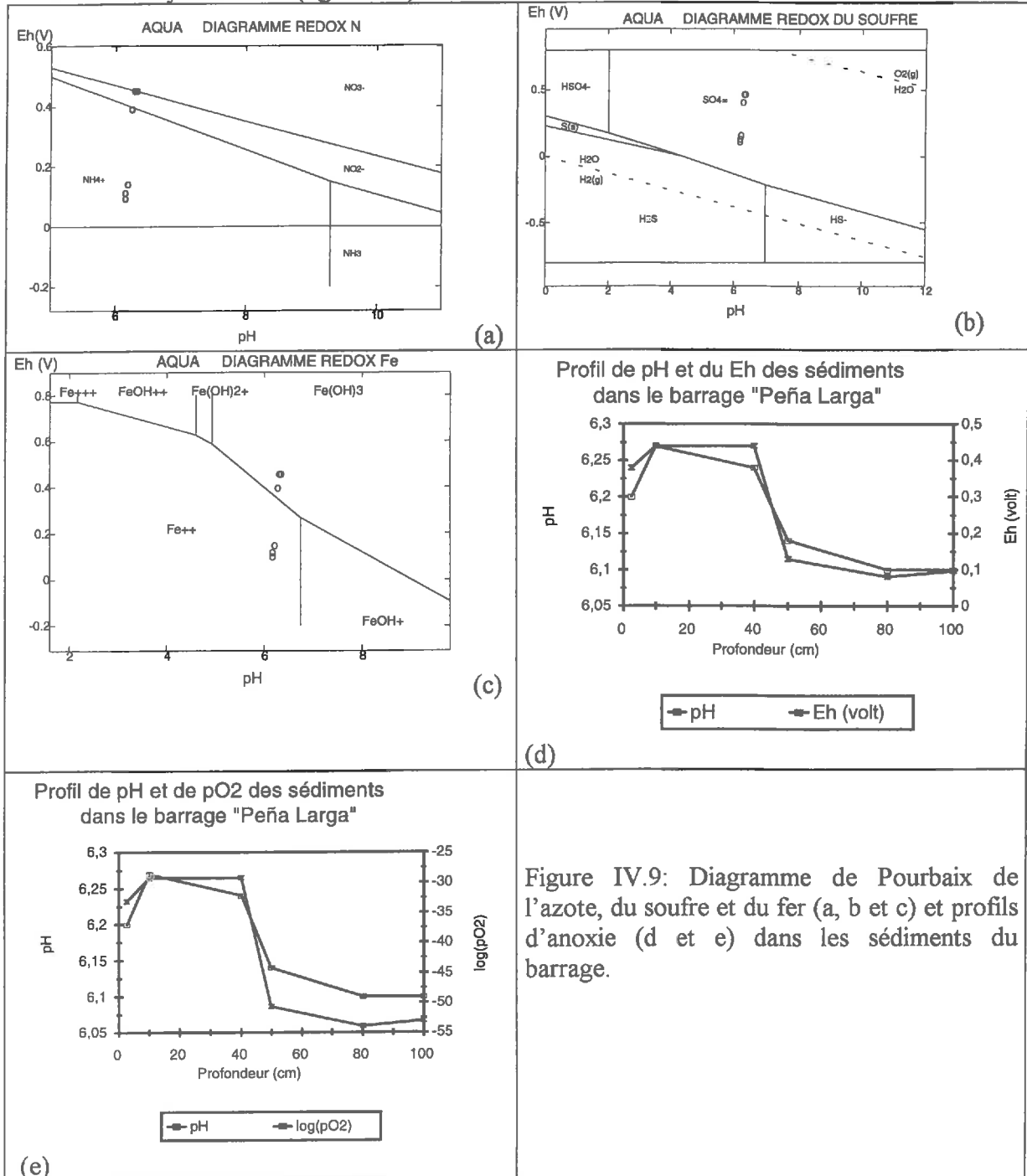


Figure IV.9: Diagramme de Pourbaix de l'azote, du soufre et du fer (a, b et c) et profils d'anoxie (d et e) dans les sédiments du barrage.

Le profil étudié était constitué de la superposition de deux types de sédiments; des sédiments sableux grossiers très poreux surmontant une couche de sables plus fins et riches en carbone organique au delà de 40 cm de profondeur.

A partir de ces triplets (pH, Eh, température), il est possible de calculer la pression partielle équilibrante en oxygène (fig. IV.9 (d) et (e)) et de replacer les points dans les diagrammes de Pourbaix (fig. IV.9 (a), (b) et (c)).

En surface, les conditions sont relativement peu anoxiques mais suffisamment pour permettre la dénitrification des eaux. Au delà de 40-50 cm, l'asphyxie devient très importante. Le fer peut être massivement réduit et solubilisé, ce qui favorise la dissolution des minéraux ferriques (oxydes/hydroxydes ferriques, silicates d'aluminium et de fer tels que certaines argiles ou micas). Cet élément est susceptible de migrer et de se re-oxyder au contact de l'air. Les observations réalisées à différentes époques confirment que ce phénomène est fréquent et abondant dans les sédiments du barrage.

Cependant, pour le profil étudié, les conditions ne sont pas suffisamment anoxiques pour produire une sulfato-réduction. Ceci peut s'expliquer par une modeste aération liée à des mouvements de nappe (Garcia, 1996) lors des échanges nappe/rivière. Ce résultat confirmerait l'importance de ces échanges.

La présence de la nappe à 80 cm lors de la mesure et qui ne semble pas affecter la distribution verticale de l'asphyxie confirmerait cette observation.

Simulation de l'impact de ces processus sur les caractéristiques des eaux de nappe à l'exutoire

Une simulation thermodynamique de la réduction de l'échantillon S35 a été réalisée.

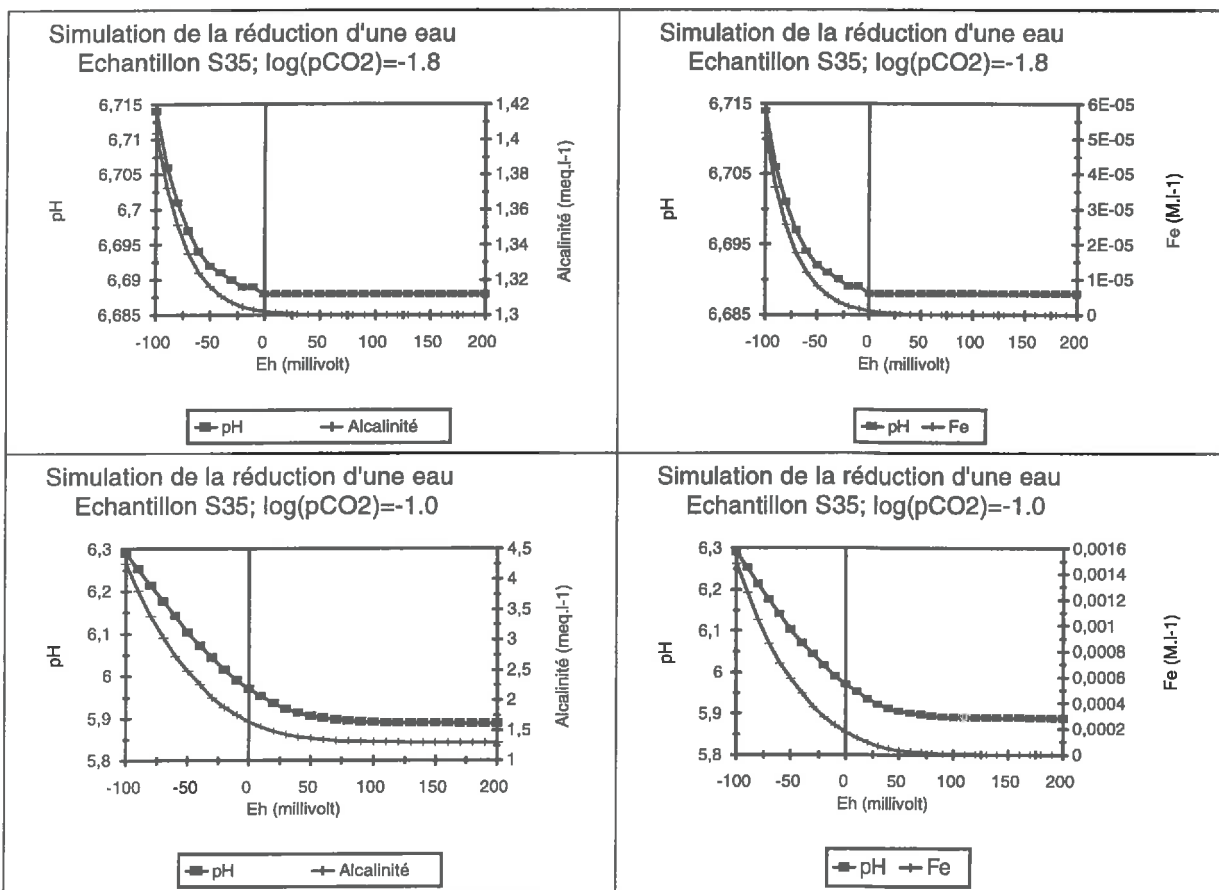


Figure IV.10: Résultats de la simulation de la réduction des eaux interstitielles des sédiments du barrage.

Ce dernier a été prélevé dans le río Boconó à son entrée dans le barrage avec un pH de 6,04 correspondant à une $\log(p\text{CO}_2) = -1,17$.

Les résultats de la simulation à deux niveaux de $p\text{CO}_2$ (fig. IV.10) montrent que lors de la réduction, la solubilisation du fer ferreux conduit à une augmentation de l'alcalinité et à une légère remontée du pH. L'engorgement du milieu produit en outre une augmentation de la pression en CO_2 , non prise en compte dans cette simulation, qui devrait atténuer la croissance du pH.

Cette simulation montre qu'avec la réduction, les minéraux contenant du fer sont susceptibles d'être solubilisés, en premier lieu les oxydes ferriques (cas de la simulation) mais aussi des silicates tels que des argiles ferriques ou des micas (biotite par exemple), ce qui peut conduire à la libération des autres éléments contenus dans le minéral. Ceci pourrait expliquer l'augmentation des concentrations en K, Na et de l'alcalinité observées au niveau spatial pour l'exutoire.

4.2.5 Etude des mécanismes de distribution de $\delta^{18}\text{O}$ dans les pluies.

Les pluies de la période du 3 au 19 juillet 1995 ont été analysées. Les données obtenues sur 10 stations météorologiques et concernant cette période ont été traitées selon les caractéristiques d'altitude (fig. IV.11).

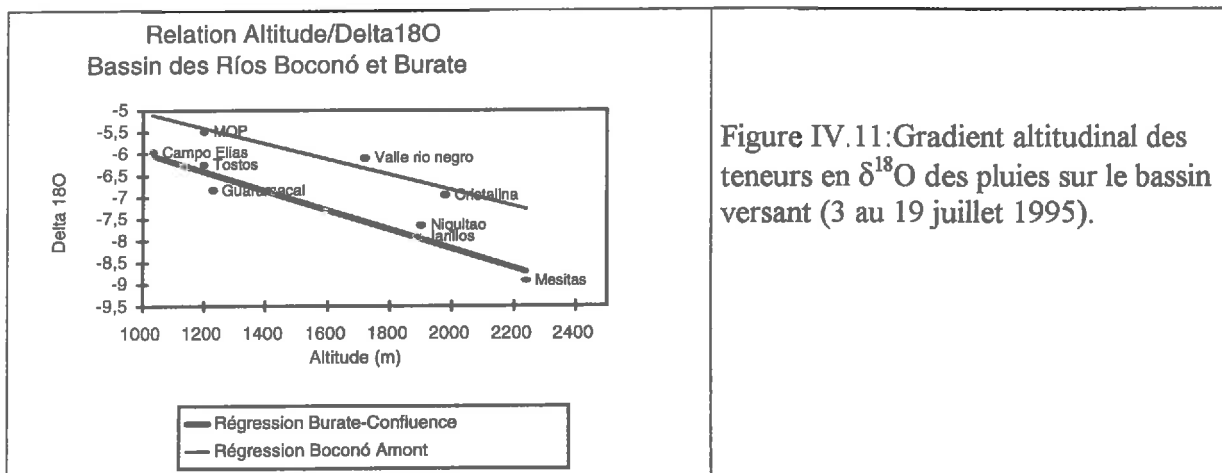


Figure IV.11: Gradient altitudinal des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ des pluies sur le bassin versant (3 au 19 juillet 1995).

- gradient altitudinal

Le $\delta^{18}\text{O}$ des pluies diminue avec l'altitude. Cependant, la relation globale cache une certaine hétérogénéité. La distinction des deux branches du bassin versant laisse apparaître deux relations de même pente (Figure IV.11).

Ce résultat suggère l'existence d'une relation altitudinale de 0,3 ‰ pour 100 m de dénivelée, mais pour deux masses nuageuses distinctes. La première arrose la vallée du Burate et la confluence Boconó/Burate; la seconde concerne la partie amont du río Boconó (*c.f.* chapitre II).

Le gradient altitudinal obtenu sur le bassin est comparable aux données habituellement publiées pour d'autres continents (Fontes, 1976). Ceci constitue un acquis au niveau des connaissances pour le milieu andin.

- mouvements de la masse d'air

Les résultats obtenus dans ce paragraphe doivent être comparés à la carte de répartition pluviométrique (Figure II.6) et à la distribution spatiale de $\delta^{18}\text{O}$. Ainsi, il apparaît clairement deux zones principales de pénétration des pluies sur le bassin versant. La première voie d'accès est le couloir creusé par le Boconó au travers du Guaramacal. Lorsque la masse d'air remonte cet étroit passage, elle décharge en grande partie de la pluie sur le versant nord

de Guaramacal arrosant ainsi le centre du bassin y compris la confluence Boconó-Burate. Cette masse nuageuse déjà moins chargée en humidité, continue en direction de l'ouest du bassin du Burate, qui reçoit un faible volume de précipitation; ceci coïncide avec les valeurs très négatives de $\delta^{18}\text{O}$ correspondant à l'épuisement des réserves d'eau des nuages.

L'autre zone de pénétration des masses d'air est la partie est du río Boconó, vallée du río Negro, secteur limitrophe entre le bassin versant du río Boconó et le río Guanare. Dans cette partie du bassin se retrouvent, les pluviométries les plus fortes. Les massifs à franchir sont moins élevés que pour le centre du bassin, les nuages perdent moins d'eau que ceux qui doivent franchir le défilé du Boconó au travers du Guaramacal. Ces masses nuageuses atteignent alors le bassin versant du Boconó moins appauvries en isotopes lourds (-5,97‰ à la station Campo Elías, -6,91‰ à la station valle del río Negro) que pour la masse d'air pénétrant par le centre du bassin.

4.2.6 Mécanismes de distribution de $\delta^{13}\text{C}$ organique

La distribution spatiale des caractéristiques de la matière organique sont dépendantes de la nature de la végétation (plantes C3 ou C4) et indirectement du climat qui est en partie responsable de la distribution des plantes sauvages ou cultivées. La lithologie intervient aussi par l'apport ou non de matière organique fossile. Cette distribution est donc plus complexe que celle des éléments chimiques dissous. Ainsi, la distribution du carbone organique dans le bassin du Boconó est liée à deux origines principales.

La première source de carbone organique est fossile; elle est présente dans les formations de lutites pyriteuses du secteur Vitisay et des lutites peu pyriteuses caractéristiques des quebradas Chandá et Segovia qui ont été soulevées par des mouvements tectoniques et qui s'exposent en surface. Il faut noter qu'une fois la roche exposée en surface, l'installation de la végétation devient restreinte et l'apparition du ruissellement se produit immédiatement après, même, d'une petite averse. Le carbone organique présente une signature très particulière en $\delta^{13}\text{C}$ au voisinage de -25 ‰ pour les roches de Vitisay et -28,1 ‰ pour le secteur Chandá et Segovia.

La seconde origine du carbone est actuelle et est associée à la dense forêt et aux cultures qui occupent le centre du bassin. Il est possible de distinguer deux sources de carbone récent. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et le rapport C/N permettent en effet de différencier respectivement le type de végétal (plantes en C4 ou en C3) ainsi que son origine verticale (litière ou humus). Les plantes C4 cultivées comme le maïs et la canne à sucre se localisent à des altitudes inférieures à 1 800 m. environ. En revanche, la forêt occupe une gamme plus étendue d'altitudes. Elle débute depuis les plus basses altitudes et atteint les zones nivales. Par ailleurs, la forte production de biomasse dans cette forêt dense provoque un recyclage interne du carbone, ce mécanisme typique des forêts tropicales (Briand *et al.*, 1993) induit des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ comprises entre -29‰ et -31‰, valeurs trouvées dans les débris végétaux provenant de cette forêt. Par contre, les cultures en C4 telles que le maïs ou la canne à sucre, cultures abondantes sur le bassin, présentent une signature caractéristique comprise entre -14‰ et -12‰.

L'autre mécanisme responsable de l'acquisition de la signature C/N est le processus d'humification, qui se traduit par une variation du rapport C/N depuis 30 pour les débris végétaux jusqu'au 10 pour l'humus. En revanche, la comparaison des divers paramètres, en particulier C/N et du $\delta^{13}\text{C}$, entre les différentes séries d'échantillons (Fig. IV.12) fait apparaître que de manière générale, les feuilles des végétaux présentent les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ les plus basses. Il semblerait qu'il se produise un certain fractionnement isotopique lors de l'humification car les litières semblent plus riches en ^{13}C . Les sédiments prélevés dans les divers affluents sont comparables aux litières en terme de $\delta^{13}\text{C}$.

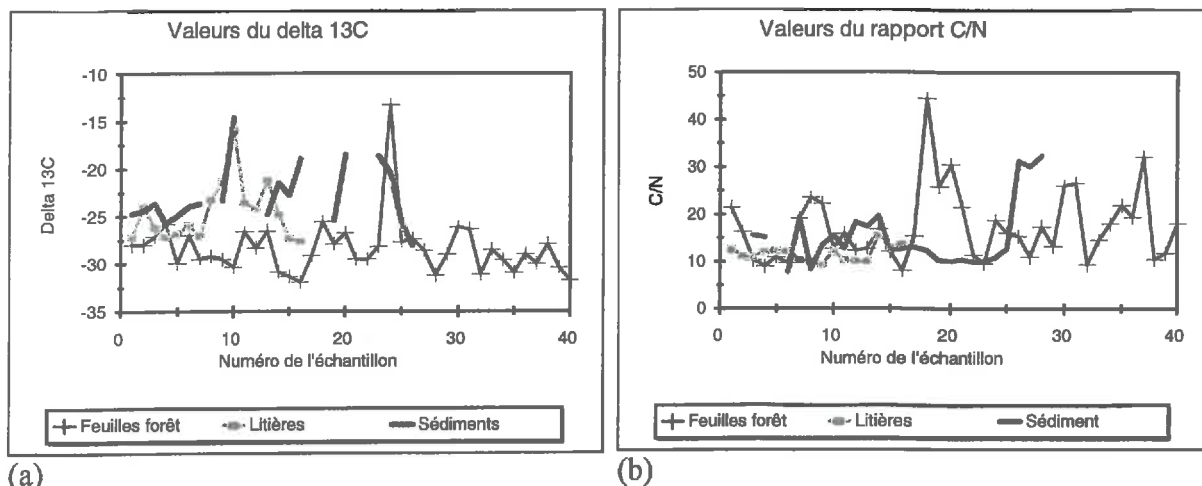


Figure IV.12: Comparaison du $\delta^{13}\text{C}$ (a) et du rapport C/N (b) entre les feuilles, les litières et les sédiments de divers sites des branches Boconó et Burate.

4.3 Synthèse sur les ensembles géographiques et leurs signatures

Après avoir vu les caractéristiques des différents secteurs qui constituent le bassin du río Boconó, cette dernière partie du chapitre tentera de les regrouper en 9 unités bien différenciées. Cette distinction est possible grâce aux contrastes importants du réseau hydrologique, aux différences altitudinales qui se manifestent sur la répartition des pluies, à la diversité du substratum lithologique qui se traduit sur le marquage des eaux et le type de M.E.S., mais aussi aux divers types des couvertures végétales (végétation naturelle et culture) qui induisent un marquage en $\delta^{13}\text{C}$ qui permet de les différencier. La définition de ces unités se fera de l'amont vers l'aval. (Tableau IV.3)

Tableau IV.3

Composition chimique de l'eau des différentes unités géographiques du bassin versant du río Boconó.

Réf.	t °C	C.E. $\mu\text{S.cm}^{-1}$	pH	Cl mg.l^{-1}	SO ₄ mg.l^{-1}	NO ₃ mg.l^{-1}	Alc mMc.^{-1}	Na mg.l^{-1}	K mg.l^{-1}	Ca mg.l^{-1}	Mg mg.l^{-1}
ZC S43	17,6	67,7	8,20	0,656	5,881	0,375	0,68	3,703	1,311	5,005	1,647
ZC S60	15,4	17,0	7,46	0,441	0,633	0,711	0,38	5,225	1,063	7,962	1,166
MY S112	18,0	168,3	8,01	0,583	15,525	0	1,36	0,403	0,383	31,71	1,729
MY S126	29,0	304,0	8,15	0,868	45,54	0	2,74	2,075	0,685	61,904	9,109
VIT C8	21,2	3 430,0	2,40	1,48	14119,4	0	-57,28	12,969	0,022	4580,4	134,75
GU G6	23,5	164,7	7,86	0,551	16,643	0	1,23	4,574	0,478	24,17	3,119
GU G9	25,0	185,0	7,40	1,033	46,629	0,145	0,32	13,2	1,784	7,221	6,111
EX S138	31,0	159,3	8,03	0,726	10,343	0,559	0,70	2,275	1,582	14,629	1,511

ZC: Zone cristalline MY: Zone de moyenne et basse montagne VIT: Secteur Vitisay
 GU: Versant Nord-Est de Guaramacal EX: Zone de sédimentation du barrage

4.3.1 La zone cristalline: los páramos (ZC).

Ce secteur s'étale d'ouest à est occupant ainsi les deux branches principales du bassin versant. Elle comprend les sommets rocheux et les diverses formes glaciaires et périglaciaires à fortes pentes. Côté Burate, ce secteur s'étend jusqu'au bassin de la Vitisús.

Cette zone à températures fraîches a une moyenne annuel pluviométrique entre 1 000 et 1 100 mm enregistre les valeurs isotopiques les plus négatives du bassin (-8,92‰ pour la station météorologique de Las Mesitas). Les eaux provenant des zones cristallines sont très diluées et l'alcalinité constitue l'anion dominant. La conductivité électrique s'avère comme un traceur pour ce secteur.

Au niveau de marquage de M.E.S., ce sont les minéraux feldspathiques et les micas biotites et muscovites provenant de la lente décomposition des granites et gneiss.

4.3.2 La haute vallée de Boconó ou vallée du río Negro:

La haute vallée de Boconó est caractérisée par la présence d'une forêt dense dans un milieu très humide source de carbone organique récent. L'activité biologique dans ce secteur est abondante, ceci induit la présence de nitrates qui constitue un des marqueurs de ce secteur.

L'accumulation de sédiments relativement fins provenant des schistes ajouté à la présence d'une nappe alluviale induisent de valeurs de pCO₂ très faibles, semblables à celles présentes dans les zones de dépôts du barrage, montrant ainsi des processus de réduction et de libération de métaux.

Les masses nuageuses provenant de l'est du bassin donnent des valeurs de δ¹⁸O lourdes et opposées à ceux du reste du bassin.

4.3.3 Le sous bassin du San Miguel:

Individualisé à cause de la faille oblique qui traverse ce sous bassin, San Miguel présente une lithologie assez particulière, caractérisée par des argilites ferrugineuses, ce qui lui permet de marquer les matières en suspension et pouvoir se différencier du reste des formations présentes dans le bassin.

Autre particularité du secteur est la présence de nitrates provenant très probablement de l'utilisation des engrais pour le maraîchage. Le couple Na-Cl fortement présent dans cet endroit est le résultat de la concentration de la pluie occasionnée pour la sécheresse relativement marquée sur cette partie et les zones périphériques. Le faible développement de la végétation naturelle dans la partie amont de ce bassin limite la production de MES organiques.

4.3.4 Les zones de moyenne et basse montagne (MY).

Ce grand secteur qui occupe le centre et s'étale sur le Boconó et Burate, est caractérisé par des eaux moyennement concentrées avec une gamme en teneurs de sodium et de chlorure qui vont de valeurs intermédiaires jusqu'aux plus fortes retrouvées dans le bassin.

Ce secteur coïncide avec la forêt et les principales exploitations de maïs, de canne à sucre et de café du bassin du río Boconó. Cette couverture du sol peut expliquer les valeurs en δ¹³C de -12 ‰ à -14 ‰ pour les plantes C4 (maïs et canne à sucre).

4.3.5 Le secteur Vitisay: exemple des eaux acides (VIT)

Les eaux provenant de ce secteur aux schistes pyriteux et des brèches carbonneuses sont concentrées avec une conductivité électrique allant jusqu'à 2 000 ou 3 000 μS.cm⁻¹. Ces valeurs sont dues à une forte teneur en sulfate qui constitue l'anion dominant.

Leur pH est acide, parfois très acide (moyenne de pH située entre 3,0 et 3,5 valeurs extrêmes allant jusqu'à 2,0) conduit à la production des fortes teneurs en métaux ainsi que des terres rares (Rare Earth Element, REE). Le matériel très meuble est susceptible de s'imprégner d'eau pendant tout ou partie de l'année. Des écoulements d'eau non superficielles, retenues dans ces matériaux, se produisent très facilement à la faveur des pentes. Les surfaces dénudées

du fait de la phyto-toxicité sont sensibles à l'érosion. Les solides sont caractérisés par du carbone organique fossile.

4.3.6 Versant nord-est du Guaramacal (GU)

Par sa localisation, ce versant coule vers le Boconó sur tout le secteur compris entre la ville de Boconó et la confluence avec l'Anús. Il s'agit d'un secteur à dense forêt qui enregistre d'importantes précipitations. Cette unité est essentiellement composée de roches charbonneuses peu pyriteuses et plus dures que celles du secteur Vitisay, elle présente aussi des affleurements volcanoclastiques. Ces matériaux sont riches en cations alcalino-terreux, ceux-ci s'avère comme des traceurs pour ce secteur.

La valeur de $\delta^{13}\text{C} = -30$ confirme l'origine du carbone organique provenant de la forêt.

Cet unité rassemble les affluents, principalement de la rive gauche de Boconó, entre les torrents: Segovia, Chandá, Corojó, Tigra et Raya.

4.3.8 Le bassin du río Anús

C'est une unité en peu hétérogène, mais que dans l'ensemble présente des eaux moyennement concentrées mais moins que dans le secteur précédent.

Les eaux sont moins sulfatées et plus alcalines que l'unité antérieur.

La faiblesse de l'échantillonnage dans le massif de Guaramacal impose beaucoup de prudence pour une caractérisation géochimique plus détaillée de ce massif.

4.3.9 Zone de sédimentation du barrage (EX)

Dans le barrage, les sédiments récemment enfouis ont une couleur noire caractéristique des probables apports du río Burate riches en carbone organique fossile. Les eaux issues de ce milieu sont très réductrices ainsi les processus de réduction conduisent à une solubilisation massive du fer par attaque des minéraux contenant cet élément.

Autre paramètre qui se révèle comme indicateur de ce processus de réduction est l'estimation de la $p\text{CO}_2$ où les valeurs restent très négatives.

Ils emprisonnent aussi quantité de matière organique fraîche qui évolue rapidement grâce au climat chaud en permanence.

Les conditions d'asphyxie sont marquées et la pression en CO_2 est élevée.

4.4. Typologie des traceurs et marqueurs

A partir de la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques et de l'étude des mécanismes d'acquisition des signatures, il est possible d'établir une typologie des traceurs et marqueurs (Tableau. IV.4)

Tableau IV.4 Stabilité des traceurs

<i>Couple</i>	<i>Burate</i>	<i>Boconó 1994</i>	<i>Boconó 1995</i>	<i>Corojó</i>	<i>Jarillos</i>	<i>Spatiale</i>
C.E/SO₄	0,75492	0,85276	0,96547	0,91774	0,99685	0,83998
C.E/Alc.	0,98609	0,92853	0,99406	0,94794	-0,99081	-0,87881
Na/Cl	0,91036	0,42940	0,88825	-0,00316	-0,52068	0,37344
C.E/Cl	-0,65861	0,38281	0,22300	-0,13935	-0,78190	0,20400

Le sulfate et la conductivité électrique:

Ces deux traceurs donnent à peu près la même information. Les fortes valeurs sont relevées sur les formations sédimentaires tandis que les plus faibles sont localisées sur le secteur pyriteux de Vitisay. En revanche, les valeurs plus faibles caractérisent les «Páramos» zones froides sur roches cristallines.

Ces deux paramètres sont liées à l'origine géographique des eaux. La différence d'information véhiculée entre ces deux traceurs est reliée à la réserve alcaline des eaux.

L'alcalinité.

La conservativité de ce traceur est légèrement entachée par les processus géochimiques tel que l'équilibre avec la calcite. Elle provient de l'altération de feldspath et de la dissolution de la calcite. L'altération de feldspaths contenus dans les roches cristallines et moins importante que sur les roches volcanoclastiques.

Le sodium et le chlorure.

Ces deux éléments traceurs sont rattachés aux origines atmosphériques et climatiques caractéristiques du bassin.

Dans le bassin, ils informent sur les déplacements des masses d'air comme du type de climat propre à chaque sous bassin.

$\delta^{18}O$.

Il donne des informations sur l'origine des eaux de pluie. La relation altitude- $\delta^{18}O$ pluie, confirmée avec ce traceur permet d'envisager l'estimation des signatures propres à chaque sous bassins à partir de son altitude moyenne; il est aussi possible de distinguer les mouvements des masses d'air dans le bassin, le traçage qu'offre ce paramètre peut être utile pour reconnaître la participation des différents réservoirs lors des crues.

En ce qui concerne les différents marqueurs, trois groupes se distinguent.

L'azote, le phosphate et le potassium.

Ce groupe de marqueurs est reconnu comme des indicateurs de l'activité biologique (minéralisation de la matière organique) dans le bassin.

Le potassium a une composante un peu particulière par rapport au reste du groupe, il est lié aux formations sédimentaires localisées au versant nord-est du Guaramacal, ceci lui donne une propriété de marqueur de surface.

Le matières en suspension.

Il s'agit d'un marqueur minéralogique. L'analyses de rayons X et l'étude pétrographique réalisées sur quelques échantillons montrent la présence d'amphiboles provenant des roches volcanoclastiques et des amphibolites. L'étude par ACP inclus dans l'annexe, montre une association avec le potassium ce qui le classe comme un marqueur de surface.

La teneur en carbone organique, le C/N et le $\delta^{13}C$.

Le carbone a permis une différenciation des deux types de matériaux et origines. La teneur en carbone organique marque et différencie la lithologie (lutites pyriteuses) d'autre carbone organique présents. Il est possible ainsi de reconnaître un réservoir géographique des origines des eaux. En revanche, le rapport C/N informe sur l'origine verticale du carbone organique entre les litières et l'humus.

Le $\delta^{13}C$ a été utilisé pour établir une différenciation entre le type de carbone organique fossile et le carbone organique récent. Ce marqueur informe aussi sur l'origine végétale du carbone organique.

pCO₂

Ce paramètre informe sur l'état d'aération des eaux. En effet, le bassin est caractéristiques par des eaux avec l'équilibre avec l'atmosphère, cet effet est le résultat de la turbulence typique du réseau hydrographique du bassin versant du rio Boconó. Lorsque les contributions de la nappe alluviale de l'exutoire se manifestent, la charge en CO₂ augmente, donc la pCO₂ devient un marqueur utile essentiellement pour identifier les mélanges à l'exutoire.

4.5 Conclusion du chapitre

D'après la littérature, plusieurs études sur le traçage naturel de l'eau à différentes tailles ont été confrontées au problème de l'atténuation du signal lorsque la surface du bassin devient plus importante. Cette problématique de la taille du bassin considéré s'est d'ailleurs posée à plusieurs reprises dans ce chapitre.

Le traçage naturel est seulement possible si les contrastes entre unités sont suffisamment marqués (Ribolzi *et al.*, 1996; Marc, 1990, ...). Malgré la taille du bassin du río Boconó, la recherche d'une typologie des traceurs et marqueurs au niveau spatial a été favorisée par les forts contrastes entre les unités.

La distribution spatiale a permis d'approfondir la connaissance du bassin versant du río Boconó. En effet, si l'existence de structures spatiales apparaissait dès le chapitre I, cette étape de la recherche de signatures propres à chaque unité a permis de reconnaître des mécanismes et des origines bio-géochimiques qui n'avait pas été possible de discerner par l'approche purement naturaliste. L'utilisation des outils statistiques et géochimiques a ainsi permis d'identifier ces traceurs et marqueurs. La meilleure connaissance des mécanismes responsables de l'acquisition des signatures, tant chimiques qu'isotopiques, est un sérieux atout car elle permet d'extrapoler éventuellement quelques données manquantes.

L'existence des plusieurs familles de traceurs et marqueurs permet toutefois d'espérer une certaine diversité et richesse d'information véhiculée par ces paramètres physico-chimiques.

En effet, cette étude spatiale des caractéristiques hydrochimiques et la caractérisation des unités fonctionnelles a permis de mettre en évidence des marqueurs et traceurs aussi divers que: la pCO₂ (phase gazeuse), divers éléments dissous ou isotope de l'eau (phase aqueuse) et des paramètres physico-chimiques ou isotopiques des matières en suspension (phases solides).

Cependant, ces résultats ne permettent pas encore de déterminer si les contrastes présents dans le bassin versant du río Boconó sont suffisants pour permettre l'identification des traceurs lors du suivi de crues selon l'échelle spatiale considérée.

La problématique de changement d'échelles constituera le fil directeur de l'étude de la dynamique de l'eau, des éléments dissous et particuliers dans les deux prochains chapitres.

CHAPITRE V

ETUDE DES MECANISMES DE TRANSFERTS D'EAU, D'ELEMENTS DISSOUS ET PARTICULAIRE DANS DEUX TORRENTS

Le réseau hydrographique comporte deux domaines de pentes (Chapitre II). Le premier concerne l'amont des deux sous bassins principaux ainsi que l'ensemble des torrents couvrant les versants. Il se caractérise par de fortes pentes. Le second domaine est constitué par les deux principaux axes du réseau dont la pente est moins forte. Ce chapitre traitera du premier, c'est à dire du domaine des torrents situés sur les versants.

Le transfert d'eau, d'éléments dissous et particuliers sera étudié dans deux torrents grâce aux traceurs chimiques et isotopiques précédemment identifiés (Chapitre IV). La mise au point d'une méthode de traçage cherchera à différencier les réservoirs tant verticalement que géographiquement. Cependant, à la différence des branches Boconó et Burate qui seront traitées dans le chapitre suivant, les torrents Jarillos et Corojó ne feront pas l'objet de bilans d'exportation car les débits n'ont pas été calculés faute de courbe de tarage. Ce chapitre abordera donc les transferts sous un angle qualitatif.

Enfin, les torrents Jarillos et Corojó ont été choisis pour leur représentativité lithologique (localisation en partie sur les formations de lutites pyriteuses) et la structure de leur réseau hydrographique. En effet, en terme de pente et de morphologie, ils sont représentatifs de l'ensemble du bassin.

5.1 Etude d'une petite crue dans un affluent du Burate: Los Jarillos

Le bassin versant du torrent Jarillos couvre une surface de 8 km² et la longueur de son cours est d'environ 5 km. Du point de vue lithologique et géochimique, ce torrent est représentatif des affluents circulant sur les formations de lutites pyriteuses.

Le point de mesure se situe à l'aval du torrent, à 200 m environ de sa confluence avec le Río Burate. (*c.f.* fig. II.15)

5.1.1 Les variations limnigraphiques

La petite crue échantillonnée le 14 juillet 1995 résulte d'une faible pluie (0,4 millimètres à la station Niquitao). La chronique horaire des précipitations de cet épisode n'a pas pu être obtenue. La collecte des échantillons a débuté vers 10h28, ce qui correspond à la fin de la pluie et à la période de montée de crue; le premier point du limnigramme est à 0,5 cm ce qui montre que la crue avait déjà commencé. A ce moment, les ravines situées dans les lutites pyriteuses canalisent encore des écoulements superficiels qui ont été prélevés.

Cet épisode n'a pas provoqué de variations importantes de hauteur d'eau. L'amplitude est de seulement 1,6 cm (fig. V.1).

Sept phases se succèdent dans la crue dont deux en montée de crue; la première est une période de faible augmentation des débits entre 10h28 et 10h45 qui s'accélère au cours de la seconde phase, à partir de 10h50 jusqu'au pic de crue qui survient à 11h03. La décrue est plus lente et présente cinq phases; la première, assez rapide, se situe entre le pic de crue et 11h27; elle est suivie par un premier palier qui dure jusqu'à 11h41. Après ce palier, la chute des débits précède un nouveau palier pour enfin atteindre la stabilisation du flux qui constitue la dernière phase intervenant vers 13h42.

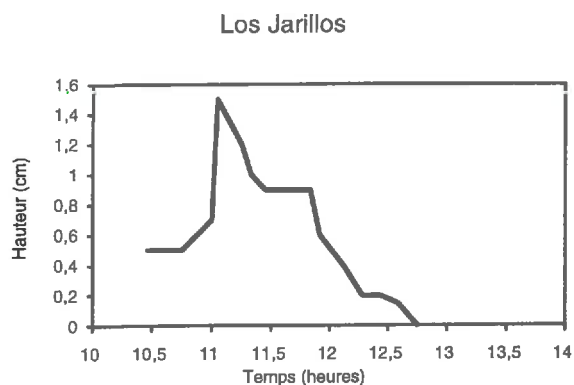


Figure V.1: Limnigramme du torrent Los Jarillos de la crue du 14 juillet 1995. Le niveau relatif 0 de l'échelle limnigraphique correspond à un écoulement de base.

5.1.2. Evolution temporelle de la chimie des éléments dissous

Le traitement préliminaire des données repose sur une analyse statistique et géochimique qui permet la discrimination de l'information (annexe I). Le premier plan de l'A.C.P. représente 84% de la variance. Le premier axe oppose deux grands groupes de paramètres chimiques, le calcium, la conductivité électrique, le sulfate et le magnésium d'une part, le chlorure et l'alcalinité carbonatée d'autre part. Le second axe oppose Ca/SO₄/Mg et conductivité électrique au potassium et sodium, ce qui montre que ces deux derniers ont un comportement intermédiaire entre les deux groupes opposés par le premier axe.

Le groupe sulfate, conductivité électrique, pH, calcium, et magnésium

C'est un groupe de paramètres fortement corrélés (annexe I) entre eux et transmettant la même information. Le calcium représente le cation majeur, bien que le magnésium soit relativement important. Pour ces trois paramètres, les teneurs les plus élevées se situent en début de crue mais diminuent très rapidement pendant le pic de crue (fig. V.2 a,b,c,d et f).

Dans la première phase de montée des eaux la conductivité électrique présente les valeurs les plus fortes de la crue ce qui suggère une alimentation par des eaux concentrées. Cet enrichissement est lié, probablement, aux écoulements superficiels provenant des lutites pyriteuses qui constituent la lithologie typique de l'aval du torrent. La teneur en sulfate, elle aussi maximale ainsi qu'un pH bas confirment cette origine (chapitre IV).

Lorsque le débit augmente la conductivité électrique diminue rapidement, avec l'arrivée d'autres écoulements moins concentrés. Ce paramètre se stabilise pendant toute la décrue. Les valeurs sont inférieures à 210 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, mais restent toutefois supérieures à la signature des eaux diluées provenant de l'altération des roches cristallines à basse température dont la moyenne se situe à 60 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ environ.

Cette conductivité relativement stable qui caractérise la décrue, peut s'interpréter de deux manières: la première hypothèse, attribuerait cette faible conductivité à un mélange des eaux concentrées par l'eau de pluie ce qui traduirait une dilution de l'ensemble des éléments dissous.

- un mélange d'eaux concentrées et d'eau de pluie (écoulement de base).
- un mélange avec des eaux diluées d'origine lointaine

La validation de ces deux hypothèses nécessite d'autres paramètres chimiques et sera abordée ultérieurement.

En début de crue, les teneurs en calcium sont relativement importantes. Au moment du pic de crue, elles diminuent et atteignent 0,94 mM, indiquant ainsi l'arrivée d'une eau provenant d'autre réservoir.

Les variations des teneurs en magnésium suivent une tendance identique à celle de la conductivité électrique.

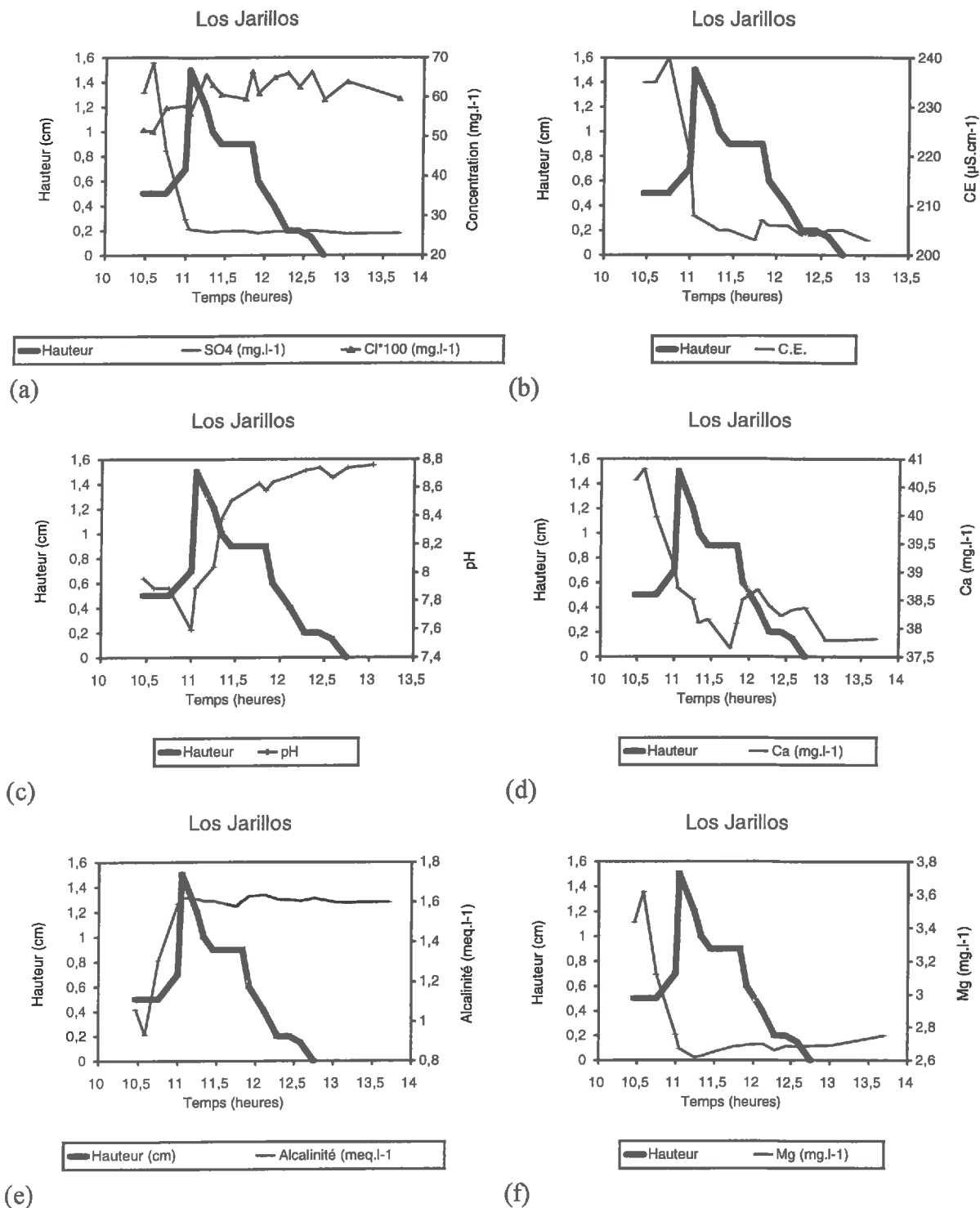


Figure V.2: Variations temporelles des teneurs en éléments dissous lors de la crue du 14 juillet 1995 du torrent des Jarillos.

L'alcalinité carbonatée et le chlorure

Fortement opposés au premier groupe mais médiocrement corrélés entre eux (annexe I) l'alcalinité et le chlorure (figures V.2 a et e) sont susceptibles d'apporter des informations différentes et complémentaires par rapport au premier groupe.

Les teneurs en chlorure sont modérées et ne présentent pas de fortes variations si l'on tient compte de l'imprécision analytique. L'interprétation de ces variations sera donc sommaire et se limitera aux tendances nettes. Les concentrations en chlorure augmentent en montée des eaux pour décroître ensuite lors de la décrue. Le maximum est atteint après le pic de crue.

Ces évolutions peuvent s'expliquer par une origine atmosphérique et par la distribution spatiale de l'évaporation. En effet, les zones lutitiques qui alimentent la montée de crue sont peu ou pas couvertes de végétation (chapitre IV). L'évapotranspiration y est par conséquent faible et les teneurs en chlorures sont tout à fait comparables à celles de la pluie. En revanche, lorsque arrivent les eaux provenant des zones forestières situées plus en amont, le chlorure atteint des valeurs maximales. Ces teneurs peuvent être attribuées à un effet de concentration dans le sol par l'évapotranspiration. En fin de décrue, la légère dilution du chlorure, à la limite de détection analytique, pourrait traduire un très léger effet de dilution des eaux initiales par la pluie ou par des eaux diluées d'origine plus lointaine localisées au dessus de la zone forestière. Ces mécanismes, déduits de faibles variations pour le Jarillos, seront amplement confirmés dans le chapitre suivant.

L'alcalinité présente des variations temporelles importantes durant l'épisode; sa teneur est très faible au début de la crue, pour ensuite croître rapidement pendant la montée des eaux; reste stable au cours de la décrue jusqu'au premier palier. Ce comportement confirme une des hypothèses indiquées précédemment; en décrue le débit est essentiellement alimenté par les eaux alcalines provenant des roches cristallines localisées à l'amont du torrent. Une simple dilution des eaux acides chargées du début de crue, par la pluie ne pourrait conduire à une augmentation de l'alcalinité. Ceci n'exclut pas une intervention modérée de l'eau de pluie.

Alcalinité résiduelle calcite (A.R.C.) et pression partielle du gaz carbonique (pCO_2)

Il convient de considérer l'alcalinité résiduelle calcite car les solutions sont en équilibre ou sursaturées avec ce minéral (annexe I). La sursaturation observée pour les faibles valeurs de pCO_2 s'explique par la cinétique lente de la précipitation de la calcite (Vallès, 1986; Ribolzi *et al.*, 1993). L'allure de la courbe caractérisant l'évolution de ce paramètre est tout à fait comparable à celle de l'alcalinité carbonatée. Cependant au moment de la décrue, l'alcalinité résiduelle calcite est plus stable que l'alcalinité carbonatée. L'A.R.C. est alors assez constante avec une légère augmentation, ce qui indique un léger enrichissement en eaux provenant des roches cristallines (0,12 et 0,05 meq.l⁻¹) d'alcalinité résiduelle calcite pour la quebrada la Coneja et Miserere respectivement). Ceci montre que même si les zones hautes alimentent l'essentiel de la décrue, la participation des zones sulfatées et concentrées est suffisante pour marquer la chimie des eaux.

La pression partielle en gaz carbonique est utilisée en temps qu'indicateur du niveau d'aération des eaux (Ribolzi, 1996). Au début de la crue (fig. V.3), les eaux présentent des valeurs caractéristiques des solutions provenant du sol mais qui certainement, ont subi une aération partielle pendant le ruissellement. A la montée et lors du pic de crue la pCO_2 augmente; ces valeurs indiquent l'arrivée de solution de sol d'origine plus profonde et moins aérée que précédemment avec des valeurs supérieures à la pression atmosphérique ($\log(pCO_2)$ voisines de -2,9). Ceci concorde avec les observations de terrain qui indiquent l'arrêt du ruissellement dès le début des prélèvements et donc une diminution de la contribution de surface. Par ailleurs, l'abondance du carbone organique dans les lutites favorise la production biologique de CO_2 dans la nappe qu'elle renferme. Ceci peut expliquer la pCO_2 élevée pour les eaux qui précèdent le pic de crue.

Pendant la décrue l'essentiel des flux est constitué par des eaux médiocrement chargées en CO_2 , caractéristiques des roches cristallines pauvres en carbone organique et dont le carbone dissous est minéral et provient de l'altération des feldspaths. Ce mécanisme a été largement étudié par Auke, (1993). Néanmoins, dans cette phase, chaque palier montre une pulsation de pCO_2 . Lors des derniers paliers la pCO_2 augmente légèrement ce qui indiquerait l'arrivée d'une eau plus riche en CO_2 , liée très probablement à de légers écoulements retardés provenant des lutites.

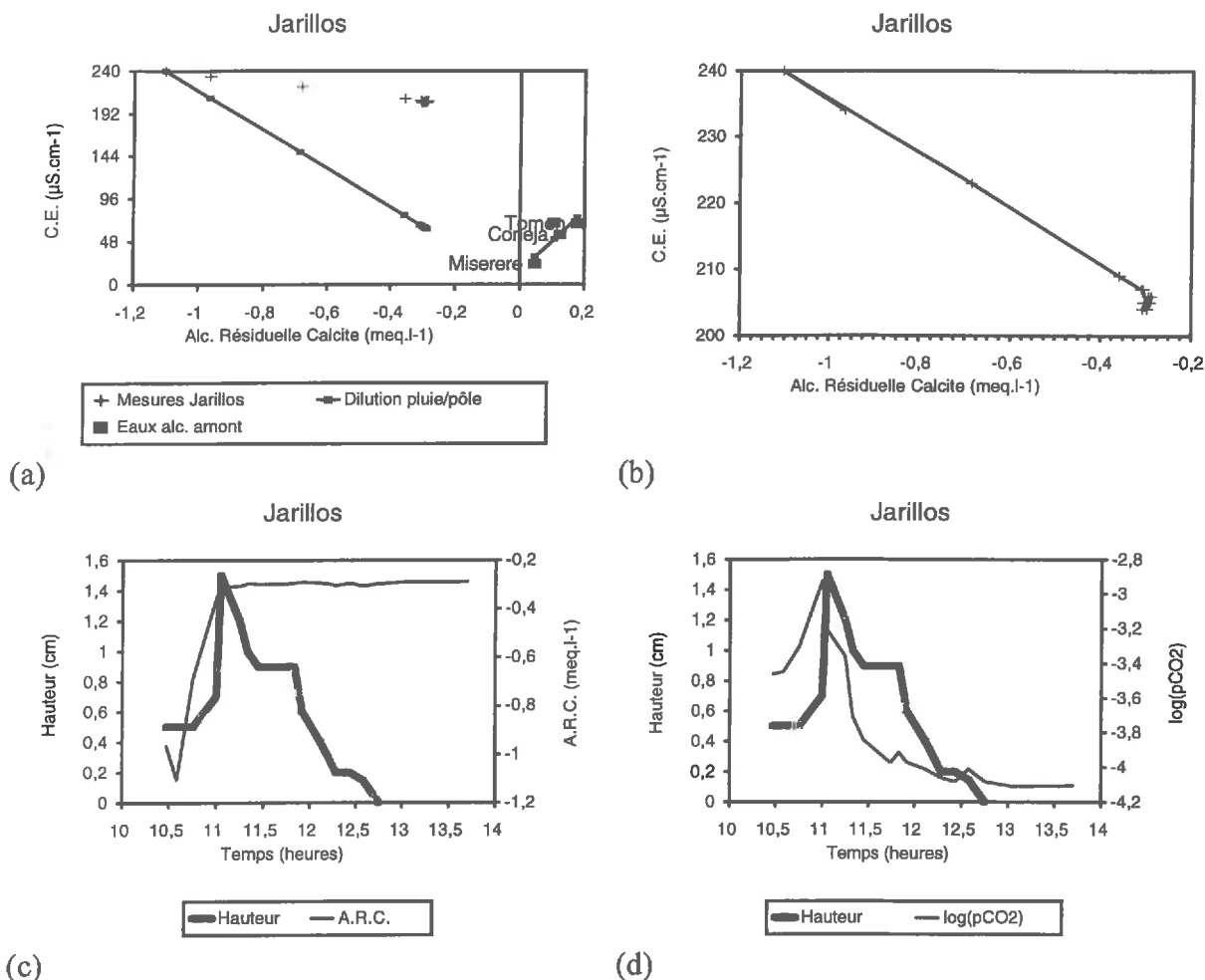


Figure V.3: Variations de la pression partielle en CO_2 et de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (A.R.C.) dans le torrent des Jarillos pour la crue du 14 juillet 1995. Comparaison avec la conductivité électrique.

L'approche EMMA (Christophersen *et al.*, 1990), décrite dans le chapitre I, a été utilisée comme un moyen de connaître la contribution des pôles participant à la crue (fig. V.3 a et b). Lorsque l'A.R.C. est croisée avec la conductivité électrique, les points représentatifs de la crue s'organisent selon un nuage allongé, ce qui suggère l'existence d'au moins deux pôles hydrochimiques. Cependant, l'examen attentif de ce nuage révèle l'existence plus discrète d'un troisième pôle.

Le premier pôle est marqué par une forte conductivité électrique et une alcalinité résiduelle calcite négative. Il correspond aux eaux issues de l'altération de la pyrite dans le secteur aval du bassin. Le second pôle est caractérisé par une conductivité électrique faible et une alcalinité résiduelle calcite positive. Il résulte de l'altération des roches cristallines. L'alcalinité résiduelle calcite et la conductivité électrique augmentent proportionnellement en particulier lorsque la température de l'altération est plus chaude (altitudes moins élevées). Le

troisième pôle est marqué par une conductivité électrique et une ARC faibles. Il s'agirait d'eau de pluie.

L'évolution du faciès chimique des eaux de crue du torrent Jarillos montre un mélange essentiellement entre le pôle concentré et le pôle alcalin. La participation du pôle pluie est très limitée. La montée de crue et le débit de pointe sont caractérisés par des eaux plus concentrées que la moyenne du torrent. A partir du pic du crue apparaît les eaux du second pôle plus diluées typiques des eaux alcalines. Pendant la décrue, la signature chimique est le résultat d'un mélange entre les deux premiers pôles. Au fur et à mesure que la décrue évolue, la participation du pôle concentré diminue au profit des eaux alcalines moins concentrées. Cependant, dès le pic de crue, un troisième pôle constitué par l'eau de pluie s'exprime; il induit une légère évolution des eaux du torrent vers la droite de mélange pôle acide/pluie (fig. V.3b).

La très faible contribution du pôle pluie suggérée par ces résultats doit être reliée à la faible intensité des précipitations. L'essentiel de la pluie s'est infiltrée alimentant la zone saturée de la nappe qui s'écoule à la faveur des pentes. Le pH et la concentration élevée des eaux de ruissellement prélevées à la base des zones de lutites (pH voisin de 3,0 et conductivité électrique supérieur à $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) montrent qu'effectivement le ruissellement ne possède pas pour cette crue une origine essentiellement atmosphérique mais au contraire souterraine.

Tableau V.1:

Caractéristiques d'eaux de ruissellement dans les zones acides des Jarillos; L'échantillon K0 a été prélevé dans des ravines sur schistes pyriteux lors de la crue, J6 plus en amont provient du contact schiste pyriteux/grès et a été prélevé le lendemain.

Référence	Heure	SO ₄ (mg.l ⁻¹)	C.E. lab. ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH terrain	M.E.S. (kg.m ⁻³)	Temp. terrain (°C)
K0	10h50	106,77	1630	3,00	1,46	19,9
J6		101,15	1758	3,06	0,35	19,8

Le sodium et le potassium

Dans le premier plan factoriel de l'A.C.P. le sodium se trouve en position intermédiaire traduisant probablement une origine mixte, tandis que le potassium montre une position plus individuelle. Pour ces deux éléments les variations de concentration restent très faibles. L'utilisation de ces deux éléments chimiques en temps que marqueur ou traceur reste très limitée à cause de leurs faibles variations lors de cette crue. Elles ne seront pas présentées ici.

5.1.3. Caractérisation et transferts de matières en suspension dans le torrent Los Jarillos

Cette deuxième partie de l'étude des transferts dans le bassin versant de Jarillos est consacrée aux matières en suspension dans le bassin. La détermination de leur origine constituera l'objectif principal. Au niveau méthodologique, un traçage naturel par le carbone organique particulaire sera aussi tenté.

Evolution de la teneur en M.E.S. lors de la crue

Pour la crue du 14 juillet 1995, les taux de M.E.S. sont relativement modestes et ne dépassent pas $0,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fig. V.4). Ce résultat doit être rapproché de la hauteur et de l'intensité extrêmement modérées de la pluie responsable de cette crue qui, malgré les fortes pentes, n'a pas provoqué de ruissellement important. Les taux maxima de M.E.S. ont été

observés au début des mesures. Ils chutent brutalement dès le pic de crue pour se maintenir à un niveau très bas pendant toute la décrue.

Les variations du taux de M.E.S. sont très significatives par rapport à la précision des mesures et elles demeurent étroitement corrélées aux variations de conductivité électrique. Ceci confirme en début de crue, une même origine pour les éléments majeurs dissous et les M.E.S., à savoir des lutites pyriteuses. L'exutoire du torrent est constitué par ce matériau meuble qui se distribue sur de fortes pentes; les M.E.S. peuvent donc être facilement entraînés par l'eau lors de crue. Cette observation a été confirmée par la présence des nombreuses ravines fonctionnelles et des éboulements importants sur l'ensemble des sites où ces formations affleurent.

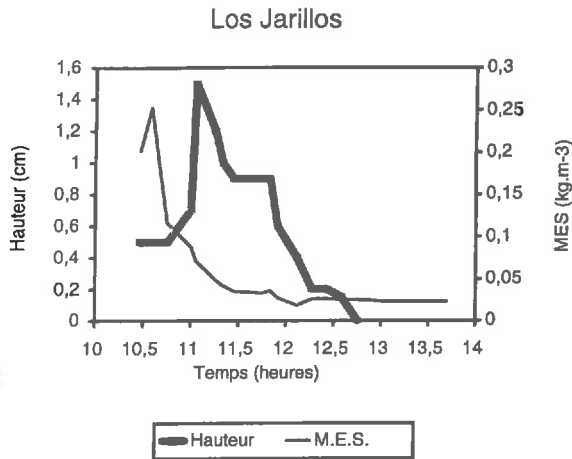


Figure V.4: Variations temporelles du taux de M.E.S. dans le torrent des Jarillos.

Evolution granulométrique des phases solides

La granulométrie peut renseigner sur le type de matériau exporté. La crue du 14 juillet 1995 se caractérise par un fort taux de particules fines, de diamètre inférieur à 100 µm.

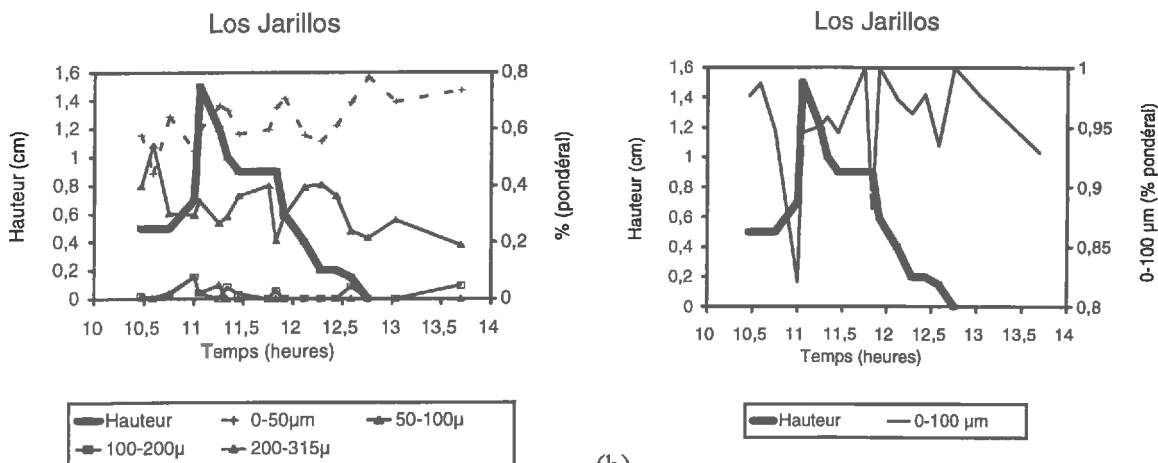


Figure V.5: Evolution de la granulométrie des M.E.S. dans le torrent des Jarillos pour la crue du 14 juillet 1995.

Au début de la crue, lorsque les eaux sont peu alcalines mais concentrées, le taux des fractions 0-50 µm à 50-100µm sont d'égale importance (Fig. V.5.a). L'ensemble de ces deux classes granulométriques représente plus de 98 % de la masse du sédiment. L'observation des M.E.S. au laboratoire montre un matériaux noir dans les premiers échantillons puis, au fur à mesure que la crue évolue, ils devient plus pâle. Une comparaison entre les classes granulométriques a été faite avec des échantillons de ruissellement de la zone des lutites

pyriteuses (tableau V.2). Dans ces derniers, les deux classes 0-50 μm et 50-100 μm représentent 98 % de la masse du sédiment et sont sensiblement égales. Il semble ainsi que l'équilibre entre ces deux fractions constitue la signature granulométrique des M.E.S. provenant des zones de schistes pyriteux. Ultérieurement les proportions des deux classes granulométriques fines divergent au profit de la classe 0-50 μm .

Deux maxima de particules plus grossières (diamètre >100 μm) surviennent; le premier correspond au pic de la crue et le second à la fin du premier palier de la décrue. Ils pourraient traduire une petite arrivée de matériaux plus grossiers originaire de l'amont, mais la faible quantité de matériaux impliqués rend délicat un développement plus poussé de l'interprétation.

Tableau V.2:

Comparaison entre la granulométrie des sédiments de Jarillos pour l'eau de ruissellement, début de crue (K1 et K2) et de la fin de la crue (K15). Les mesures ont été réalisées sur la totalité de l'échantillon.

Référence	Heure	>2 mm (%)	2 mm-1 mm (%)	1mm-500 μm (%)	500-315 μm (%)	315-200 μm (%)	200-100 μm (%)	100-50 μm (%)	<50 μm (%)
ruissell.	10h50	0	0	0,06	0,47	2,14	3,61	46,34	47,38
K1	10h28	0	0	0	0,52	1,04	0,78	39,84	57,8
K2	10h35	0	0	0	0,38	0,19	0,26	54,43	44,26
K15	12h35	0	0	0	0	4,35	2,18	23,92	69,57

Le carbone organique particulaire (C.O. P.)

Le carbone organique particulaire a été analysé sur la classe granulométrique de 0-200 μm des M.E.S., car les autres fractions ne contiennent pas de C.O.P. Le marquage des M.E.S. par le C.O.P. nécessite la connaissance de différents pôles géographiques et verticaux.

Dans le cas du torrent Jarillos, un premier pôle est constitué par les lutites; il est caractérisé par de faibles pourcentages de C.O.P., un marquage $\delta^{13}\text{C}$ intermédiaire, c'est à dire centré autour de $\delta^{13}\text{C}=-25\text{‰}$ et un rapport C/N relativement bas (tableau V.3). Ces indices montrent qu'il s'agit d'un C.O.P. d'origine fossile lié à la roche mère.

Tableau V.3:

Caractéristiques du carbone organique particulaire dans les différentes unités. Moyennes établies d'après les résultats de la campagne de prélèvements spatiaux.

Paramètre du C.O.P.	C/N (g.g ⁻¹)	C.O.P. (mg C. g ⁻¹ sédiment fin)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
Lutite	12,8	18,4	-25,6
Végétation C4: culture	35,0	45,0	-14,5
Végétation C3: forêt	36,9	348,1	-28,6
Horizon humique sous C3	18,0	30,0	-27,3
Horizon humique sous C4	12,8	1,7	-14,4

Les quatre autres pôles peuvent se distinguer à partir du $\delta^{13}\text{C}$ et du rapport C/N. Les valeurs C/N élevées, de 20 et plus, indiquent un faible degré d'humification et donc des débris organiques frais. A l'opposé, les horizons humiques sont marqués par un rapport C/N voisin de 10. Le $\delta^{13}\text{C}$ permet de distinguer les plantes à cycle photosynthétique en C4 tels que le maïs ou

la canne à sucre avec des valeurs voisines de -12 et les plantes à cycle photosynthétique en C3, c'est à dire l'essentiel des plantes du bassin autres que les cultures de maïs et canne à sucre.

Pendant la montée de crue (fig. V.6) la teneur en C.O.P. des M.E.S. est tout à fait comparable à celle de la lutite pyriteuse (18,4 mg C. g⁻¹ sédiment fin). La participation de cette roche mère dans ces premiers échantillons peut être confortée par le rapport C/N ainsi que le $\delta^{13}C$ qui présente eux aussi des valeurs proches de celles de la lutite.

Le taux de M.E.S. et l'origine du C.O.P. dans cette première partie de la crue, indiquent que les eaux proviennent des horizons du sol développés sur des lutites pyriteuses. Leur faible teneur en carbone organique vient d'une part, du fait que sur ces sols, la couverture végétale n'existe pas d'où sa faible teneur en C.O.P., mais aussi que le type de carbone organique est fossile dans ce type de sédiments.

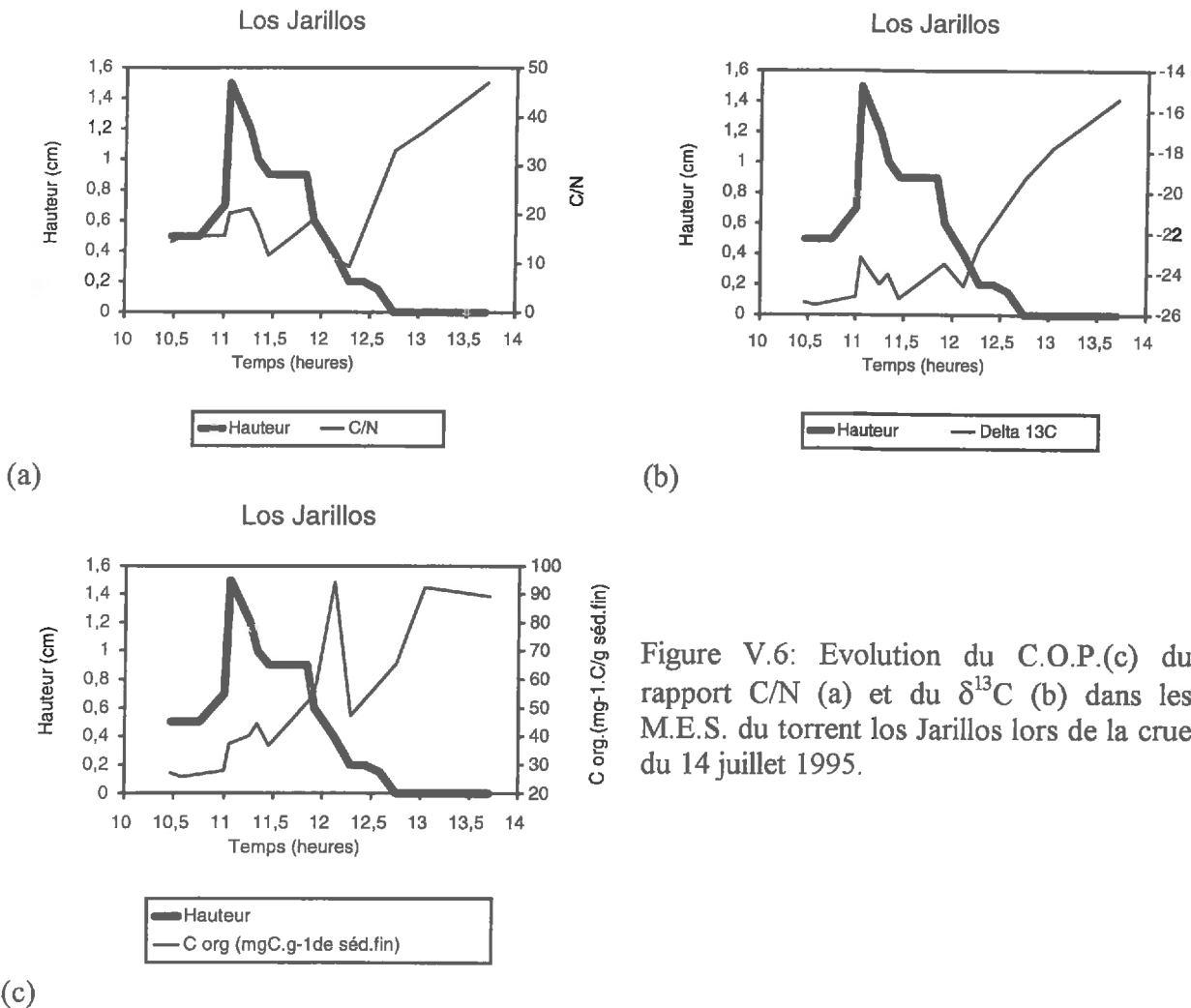


Figure V.6: Evolution du C.O.P.(c) du rapport C/N (a) et du $\delta^{13}C$ (b) dans les M.E.S. du torrent los Jarillos lors de la crue du 14 juillet 1995.

(c) A partir du pic de crue, les valeurs de C/N remontent entre 10 et 18; celles-ci sont comparables aux teneurs atteintes dans les horizons superficiels ou les litières. Ces matériaux véhiculés dans le torrent proviennent de la zone de forêt localisée au-dessus du site de prélèvement. Ces paramètres restent assez stables entre le pic de crue et l'arrivée du deuxième palier de décrue.

C'est à partir de ce deuxième palier de la décrue, qu'apparaît un deuxième pôle. L'arrivée des sédiments montre des teneurs importantes en C.O.P. jusqu'à 95 mg.g⁻¹ de sédiments fins, une évolution des concentrations en $\delta^{13}C$ de -24 à -14 et un rapport C/N supérieur à 40. Ces teneurs pourraient provenir d'une végétation de type C4 attribuée aux cultures comme le maïs ou la canne à sucre présentes dans le bassin versant du Jarillos.

5.1.4 Conclusion et synthèse sur la petite crue des Jarillos

Du fait de la faiblesse de la précipitation, la petite crue étudiée dans le torrent Jarillos n'est pas représentative d'une crue moyenne mais elle est intéressante à plusieurs titres.

Le torrent présente, lors de cette petite crue des variations importantes de la concentration en éléments dissous et des caractéristiques des M.E.S. Ceci montre la grande réactivité hydraulique de ce milieu pendant la période humide. Lorsque les sols sont gorgés d'eau, des averses mêmes minimales sont capables de modifier la chimie des cours d'eaux ainsi que de déclencher des processus érosifs. Ce résultat peut être extrapolé aux sites se développant sur ce type de matériau lutitique. Il a été possible de montrer que l'érosion des matériaux lutitiques liée au ruissellement peut être générée par les exfiltrations d'eaux acides et concentrées, suite à la recharge de la nappe par la pluie.

L'étude des mécanismes mis en jeu dans ce torrent a été possible grâce à l'utilisation de marqueurs et traceurs très divers concernant les phases gazeuse, dissoute et solides. L'utilisation d'un marqueur de la phase gazeuse a permis de différencier les réservoirs superposés intervenant lors de la crue. En revanche, les traceurs dissous indiquent plutôt l'origine géographique des eaux. Les marqueurs particuliers ont été utilisés pour distinguer le type, le degré d'humification et l'origine des sédiments transportés.

Au début de la crue, les eaux proviennent des zones de lutites, proches de l'exutoire du fait d'un temps de transfert court. Ce ruissellement est constitué d'un mélange entre une eau de surface ($p\text{CO}_2$ faible) et une eau profonde ($p\text{CO}_2$ plus forte).

La diminution du ruissellement après l'arrêt de la pluie se traduit par une augmentation de la contribution des eaux d'origine profonde qui s'exfiltrent. Les eaux chargées en sulfates arrachent la roche mère dans les ravines ce qui permet d'atteindre les taux maximum de M.E.S. Les signatures du C.O.P. de ces échantillons (teneur, C/N, $\delta^{13}\text{C}$) sont celles des lutites et se caractérisent par l'égalité des classes granulométriques 0-50 μ et 50-100 μ .

L'arrivée des eaux alcalines d'origine plus lointaine, conduit à l'apparition du pic de crue. Ce mélange d'eau sulfatée et d'eau alcaline est légèrement diluée par la contribution de la pluie vers le pic de crue. Lors de la décrue, la contribution des eaux alcalines augmente encore légèrement.

Les matériaux solides véhiculés en fin de décrue sont plus riches en matière organique et portent la signature de litières de plantes de type C4, probablement des cultures de maïs ou de canne à sucre. Ces eaux sont pauvres en CO_2 , du fait de la consommation de ce gaz pour former de l'alcalinité carbonatée, lors de l'altération de roches cristallines dans leur unité géographique d'origine.

Les mécanismes observés sur ce petit bassin versant, semblent liés au contraste lithologique et aussi au contraste de végétation. L'étude de cette crue a montré l'intérêt de marqueurs et traceurs tels que la $p\text{CO}_2$, l'A.R.C. ou le C.O.P. Ces trois paramètres représentent l'essentiel du carbone véhiculée par l'eau sous forme gazeuse, dissoute minérale et organique particulière. La seconde partie de ce chapitre consacrée à la quebrada Corojó permettra de vérifier si ces traceurs peuvent être encore utilisés lorsque la taille du bassin versant devient plus importante.

5.2 Etude d'une crue dans un torrent caractéristique de la zone du Guaramacal: la quebrada Corojó

L'épisode retenu pour le torrent Corojó est celui du 9 et 10 juillet 1995 pour lequel les deux branches principales, à savoir le río Boconó et le río Burate, ont été également échantillonnées. La description détaillée de l'épisode pluvieux figure dans le chapitre III. Les mesures et les prélèvements ont été réalisés quelques dizaines de mètres avant la confluence avec le río Boconó.

Le choix du bassin versant du torrent Corojó est basé sur des considérations d'échelles. En effet, il convient d'étudier un bassin de taille intermédiaire entre celui du petit torrent des Jarillos qui couvre quelques km² et ceux des branches principales du bassin, dont les superficies varient de 500 à 1 500 km².

5.2.1. Etude de l'hydrogramme et description des observations

Comme pour le torrent Jarillos, le torrent Corojó ne dispose pas de courbe de tarage; seules les hauteurs d'eau ont été relevées pour cette crue. Le limnigramme présente des variations qui atteignent 45 centimètres de hauteur d'eau (fig.V.7). Sept phases hydrodynamiques se distinguent pendant cet épisode.

La première est constituée par une montée assez rapide des eaux, entre 14h56 et 18h10; elle est suivie d'une brusque vague qui dure 15 minutes. Un charriage de pierres de 20 à 30 cm de diamètre se produit alors. Le pic de crue se maintient de 18h15 à 19h15. La première partie de la décrue, entre 19h20 et 20h45, est assez rapide et constitue la troisième phase du limnigramme. La quatrième phase est représentée par un premier épaulement suivi d'un second pic plus modeste que le premier à 20h45. La cinquième étape est constituée par la deuxième partie de la décrue qui se prolonge de 20h50 à 23h00; elle est suivie par un troisième pic plus étalé que les deux premiers entre 23h15 et 23h55. Enfin le tarissement s'étale sur une durée de 16h00.

Le limnigramme indique un temps de réaction du torrent très court. En effet, le centre de gravité de la pluie se situe vers 17h30 ± 30 mn pour une intensité moyenne de 11,4 mm/h. Le débit de pointe est atteint à 19h00, ce qui fournit un temps de réaction de 2h00 mn ± 30 mn. Cette imprécision importante provient du pas de temps horaire des chroniques des précipitations relevées par les stations météorologiques (pas de temps de prélèvement moyen de 5 minutes). Les observations de terrain concernant l'heure de l'averse sur le terrain, réalisées simultanément sur trois points entourant le bassin versant, permettent de préciser que le temps de réaction est plus proche de 1h30 que de 2h00. Pour un trajet minimum de 5,1 km la vitesse minimale atteinte est d'environ 0,94 m.s⁻¹ (3,4 km.h⁻¹); cette valeur doit être considérée comme une moyenne entre des écoulements concentrés et rapides se produisant dans le lit des torrents et des écoulements superficiels et moins rapides car entravés par la végétation.

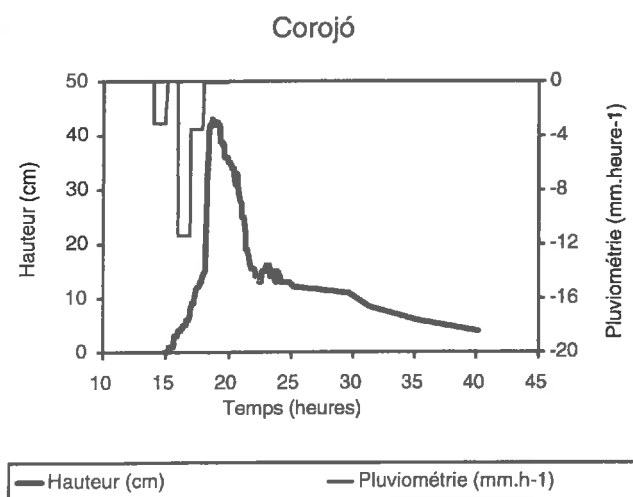


Figure V.7: Limnigramme et pluviogramme du torrent Corojó pour l'épisode du 9-10 juillet 1995.

5.2.2. Caractérisation hydrochimique des affluents de Corojó: Suerita et Corojó

Juste avant de se jeter dans la confluence Boconó/Burate, la quebrada Corojó unit les eaux de ses deux affluents principaux, la quebrada Suerita et la quebrada Corojó proprement dit (fig.III.2 et c.f. chapitre III).

Les deux torrents ont été échantillonnés juste avant et en fin de crue. Les données (tableau V.4) montrent une évolution parallèle de la conductivité électrique et de la température. La nature lithologique des matériaux transportés est très différente selon l'affluent. La quebrada Corojó véhicule essentiellement des lutites noires dans lesquelles il n'a pas été trouvé de pyrite par observation directe. Cependant, ces lutites sont plus riches en calcite que celles du bassin versant de Jarillos (Chapitre II). La Suerita transporte en revanche des grès fins ferrugineux dont les traces peuvent être retrouvées jusqu'à l'entrée du barrage de Peña Larga. Cette différence de lithologie est suffisamment importante pour affecter la couleur des eaux, noires pour la Corojó et rougeâtres pour la Suerita. De plus, cette dernière branche draine des eaux provenant d'altitudes plus élevées, ce qui se traduit par une température inférieure de 0,8 à 1,0 °C par rapport à la quebrada Corojó. Compte tenu du gradient thermique altitudinal de 0,6°C/100m, la différence d'altitude moyenne peut être estimée à 150 mètres. Les eaux de la Suerita venant de plus haut devront effectuer un trajet plus long. Les caractéristiques de la chimie des éléments dissous et le taux de M.E.S. sont nettement différentes pour les deux affluents (tableau V.4). Le contraste est particulièrement marqué pour le sulfate, le sodium et le magnésium dont les écarts peuvent atteindre jusqu'à un facteur deux pour le sodium et quatre pour le sulfate. Ceci suggère déjà la possibilité de différenciation géographique des eaux. En revanche, l'A.R.C. est peu différente d'une branche à l'autre.

Tableau V.4

Caractérisation physico-chimique des deux affluents de la quebrada Corojó.

Torrent	M.E.S. mg.l ⁻¹	C.E. μS.cm ⁻¹	Cl mg.l ⁻¹	SO ₄ mg.l ⁻¹	PO ₄ mg.l ⁻¹	Mg mg.l ⁻¹	Ca mg.l ⁻¹	K mg.l ⁻¹	Na mg.l ⁻¹
Corojó	254	234	0,449	27,015	0,038	4,92	39,6	0,472	1,72
Corojó	66	309	0,488	33,658	0,042	7,00	51,3	0,516	2,69
Suerita	62	128	0,291	6,738	0,029	1,96	21,5	0,234	0,67
Suerita	52	175	0,283	10,173	0,039	3,11	28,4	0,279	0,98

Torrent	Température °C	NO ₃ mg.l ⁻¹	pH terrain	Alcalinité meq.l ⁻¹	Alcalinité Résiduelle Calcite meq.l ⁻¹
Corojó	19,1	0,049	8,51	1,89	-0,08656
Corojó	19,7	0	8,50	2,55	-0,01068
Suerita	18,3	0	8,30	1,12	+0,04635
Suerita	18,7	0	8,17	1,50	+0,08377

5.2.3 Evolution des éléments dissous lors de crue

Comme pour les autres cours d'eau, un traitement statistique préliminaire des données a été effectué afin d'identifier les éléments dont le comportement est similaire.

L'A.C.P. a été réalisée sur l'ensemble des 75 analyses régulièrement réparties tout au long de la crue (annexe I) ; le premier plan factoriel représente 76,9% de la variance expliquée. Le premier axe (55,6%) oppose les éléments de profondeur (Na, Ca, Mg, Alcalinité et SO₄) aux éléments de surface (Cl, PO₄, et K). Na est en position intermédiaire. Le second axe (21,3%) oppose les éléments d'origine atmosphérique (Cl et Na) à ceux qui sont issus des horizons de surface (PO₄ et K). Une corrélation positive marquée apparaît entre le K et le taux de M.E.S., ce qui indique, probablement une similitude d'origine et de comportement.

L'étude géochimique des eaux, montre que le faciès varie peu pendant la crue (annexe I). Les eaux initialement caractérisées par un pôle carbonaté-calcique-magnésien puis évoluent légèrement après le pic de crue vers un pôle sulfaté pour revenir à leurs caractéristiques initiales lors de la décrue.

Le groupe sodium, calcium, magnésium, alcalinité, alcalinité résiduelle calcite (A.R.C.) sulfate, conductivité électrique, isotope stable de l'eau (δ¹⁸O) et température

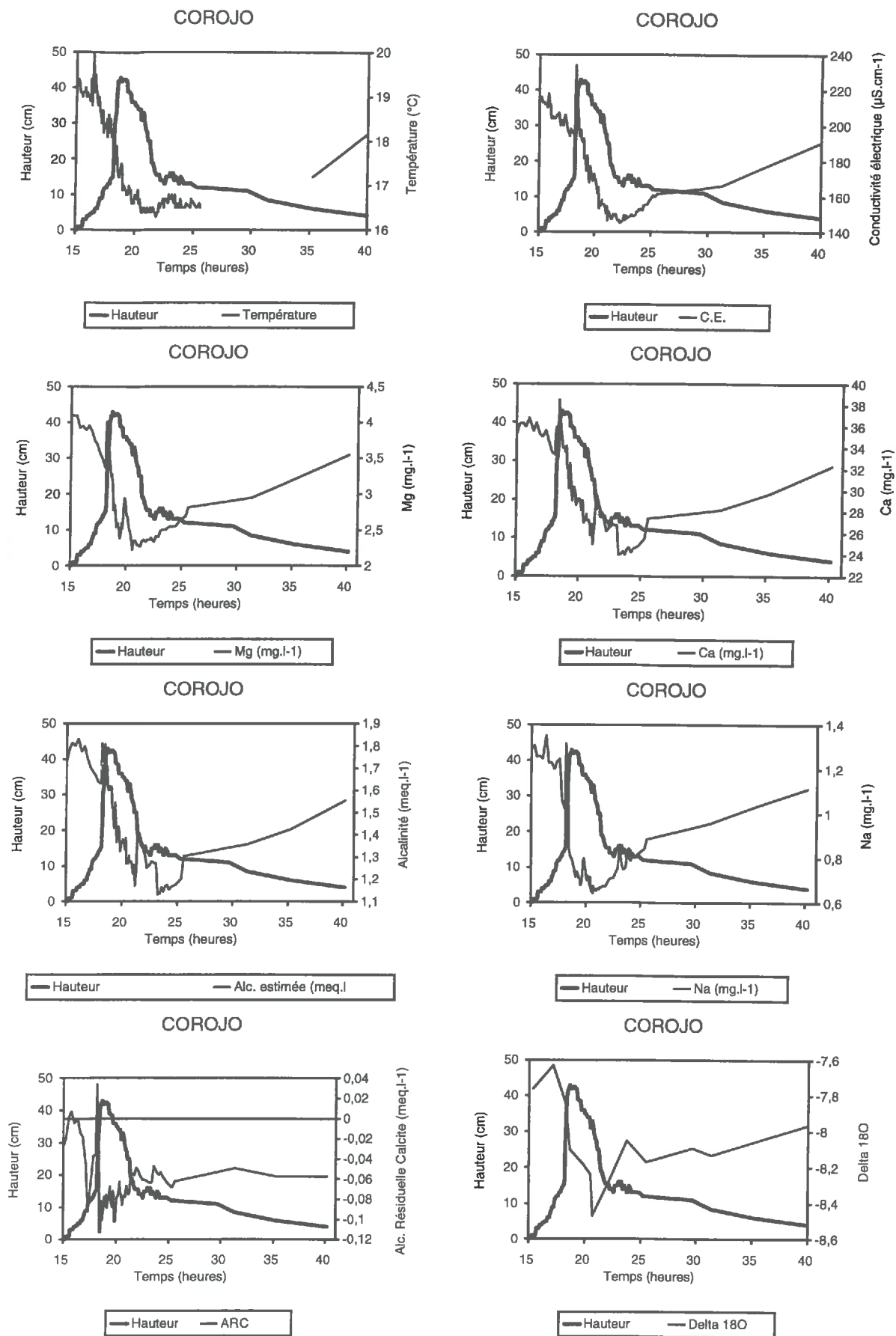


Figure V.8: Variations temporelles du premier groupe de paramètres pour Corojo lors de la crue du 9-10 juillet 1995.

Les paramètres de ce groupe sont fortement corrélés entre eux. Aussi, il est probable que les informations transmises sont comparables (Fig. V.8 et V.9).

La température a été mesurée pendant l'épisode de crue, mais malheureusement la sonde de température est tombée en panne lors des derniers prélèvements, d'où l'absence de donnée pour la dernière phase de la crue.

La conductivité électrique englobe l'essentiel des caractéristiques chimiques de la crue. Elle montre des eaux initialement concentrées qui subissent une dilution qui au fur et à mesure que la crue évolue. Cependant l'observation détaillée montre que lors de l'arrivée de la vague d'eau la conductivité, dans le cas présent, augmente brusquement; la durée de cette remontée est aussi brève que l'arrivée de la vague d'eau; les eaux qui contribuent à cette partie de la crue sont les plus concentrées de tout l'épisode; elles indiquent donc l'arrivée d'un bassin versant à écoulement rapide c'est à dire à caractère torrentiel marqué, et caractérisé par des eaux concentrées.

Pendant le pic de crue, la conductivité électrique baisse fortement et continue à décroître tout au long de la décrue. Une petite remontée de la conductivité électrique se manifeste lors des deuxième et troisième pics dans la décrue, mais elle ne semble pas significative.

Enfin, pendant le tarissement, lors de la dernière phase de la décrue, la conductivité électrique remonte aux environs de 190 μS , se rapprochant ainsi des valeurs du début de la crue.

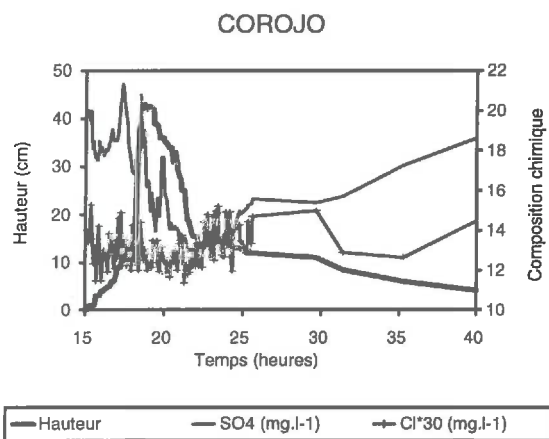


Figure V.9: Variations temporelles du sulfate et du chlorure lors de la crue du 9-10 juillet 1995 dans le torrent Corojo.

Pour la crue étudiée la tendance générale à la dilution observée au cours de la décrue peut avoir deux origines:

↳ à la participation de la pluie ou des eaux moins concentrées issues de zones cristallines à températures plus fraîches (sous bassin de la Suerita) pour confirmer cette seconde hypothèse un suivi des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$) a été effectué.

Cependant, la possibilité d'une coexistence de ces deux mécanismes est tout à fait possible.

↳ à une modification des proportions dans le mélange de deux affluents principaux quebrada Corojo et quebrada la Suerita; pour confronter cette hypothèse une décomposition qualitative a été réalisée.

↳ La participation de la pluie

Un suivi des teneurs en ^{18}O a été effectué pendant la crue (fig. V.8). Lors de la montée progressive des eaux, le signal isotopique présente des valeurs assez stables et enrichies (entre $-7,8\text{‰}$ et $-7,6\text{‰}$). Ceci pourrait indiquer la participation des eaux préexistantes, probablement des solutions du sol du sous bassin de Corojo, comme semble le

confirmer la pression partielle du gaz carbonique (c.f. paragraphes suivants). Lorsque la vague d'eau arrive, le signal isotopique commence seulement à décroître. En observant la température, il existe une légère remontée de ce paramètre ce qui montre encore l'arrivée d'eaux chaudes; ceci confirme, que la contribution de la pluie est encore faible. C'est juste après ce pic de température et avant la vague d'eau que s'observe une diminution de la température qui peut être associée à l'arrivée d'un mélange entre eau préexistante et la pluie. Plus la crue évolue et plus le signal isotopique devient faible; la valeur la plus basse se localise au niveau de deuxième pic de débit lors de la décrue. La comparaison entre la décomposition du limnigramme par la conductivité électrique et les variations de ^{18}O , montre que le signal de -8,5 ‰ de ^{18}O coïncide avec l'apparition de la deuxième composante de la quebrada Suerita plus froide.

Le signal isotopique du tarissement montre une tendance vers des valeurs proches de celles du début de crue, confirmant ainsi qu'il s'agit d'eaux provenant d'un même réservoir, très probablement de l'affluent Corojó.

Le magnésium et le sodium présentent un comportement assez similaire. Les teneurs sont très modérées, en revanche, leurs variations sont significatives. Ainsi, les maxima pour ces deux paramètres sont synchrones. Cependant pour le sodium un pic apparaît en début de crue, ce qui confirmerait la mise en circulation des eaux préexistantes. Ceci sera confirmé dans le paragraphe suivant par la pCO_2 . Le deuxième pic de débit présente pendant la décrue, est marqué par les deux paramètres, en relation avec un enrichissement sodico-magnésien des eaux originaires de la Suerita. Au fur et à mesure que la crue progresse le sodium remonte légèrement et brièvement lors du dernier pic hydrique montrant ainsi l'arrivée d'un réservoir plus lointain. Enfin, lors du tarissement, les teneurs en sodium et magnésium atteignent progressivement les valeurs du début de la crue.

L'alcalinité et le calcium sont très fortement corrélés, car le calcium et l'alcalinité sont les anions majeurs. Les courbes de ces deux paramètres sont ressemblantes et proches de celle de la conductivité électrique. Néanmoins, l'apparition d'un pic lors de la décrue montre plus nettement l'arrivée d'un réservoir alcalin et confirme ainsi les apports provenant de la Suerita.

L'A.R.C. a été examinée pour cette crue mais les faibles concentrations posent des problèmes pour l'interprétation. Pour l'épisode sur le torrent los Jarillos les variations de l'A.R.C. sont comprises entre -1,2 à -0,2 meq.l⁻¹ (soit 1 meq.l⁻¹). En revanche, pour Corojó l'écart est de 0,15 meq.l⁻¹ soit 10 fois moins; ceci montre la faiblesse des variations temporelles de ce paramètre (tableau V.4). En conséquence, une différenciation des réservoirs géographiques intervenants lors de la crue n'a pas été possible en utilisant ce paramètre.

Essai de décomposition de l'hydrogramme à partir de la conductivité électrique et du sulfate

Une décomposition semi-quantitative a été tentée à partir de la conductivité électrique des deux affluents principaux (fig. V.4). Les calculs ont été réalisés à partir d'une valeur moyenne des conductivités électriques de chaque branche, en considérant, qu'elles sont constantes au long de la crue; ce qui n'est pas tout fait le cas. Cependant, les variations restent modérées par rapport à l'écart de conductivité entre les deux affluents (Tableau IV). De plus, et en toute rigueur, la décomposition doit être réalisée sur les débits ($Q=Q_1+Q_2$) et non sur les hauteurs d'eau, du fait de la non linéarité de la relation $Q=(H)$. Cependant, pour ce type de torrents, les essais réalisés sur la branche Burate (c.f. chapitre VI) ont montré que qualitativement, les décompositions effectuées sur les mesures de hauteur d'eau fournissaient les mêmes indications qu'avec les débits. Du fait de l'absence des courbes de tarage pour Corojó, les mesures de hauteurs d'eau seront utilisées pour une décomposition «qualitative».

Les résultats obtenus (Fig. V.10) révèlent un comportement hydrologique très différent des deux sous-bassins. Pendant, la montée progressive des eaux et le pic de crue, la Corojó est l'affluent qui alimente principalement les débits.

Le temps de réaction du bassin de Corojó est beaucoup plus bref que celui de la Suerita et sa participation prépondérante dans l'écoulement peut expliquer les concentrations élevées observées à ce moment là. En revanche, la première étape de la décrue et pointe de débit qui lui est associée correspondent plutôt à l'arrivée des deux ondes attribuées à la Suerita. Les proportions du mélange changent alors en faveur de la Suerita; dont les eaux plus diluées induisent des valeurs de conductivité électrique plus faibles. Pendant la phase du deuxième pic de la décrue et le tarissement la contribution de la Suerita prédomine. Le régime de base semble donc assuré par les zones d'altitude, comme dans le cas de los Jarillos.

Le résultat de cette décomposition paraît logique si l'on considère la morphologie du bassin versant. En effet, la quebrada Corojó comporte deux branches; Corojó proprement dit, à morphologie très rectiligne et plus ramassée que celle de la Suerita caractérisée par un réseau hydrographique dendritique et localisé aux hautes altitudes. En outre, la Suerita est constituée par deux sous-bassins qui peuvent être mis en relation avec les deux pics observés pendant la décrue. En effet, ces deux sous affluents apportent leurs débits à moments différents de la crue; mais il s'agit d'eaux diluées, ce qui coïncide avec la chute de la conductivité électrique dans cette partie de la crue.

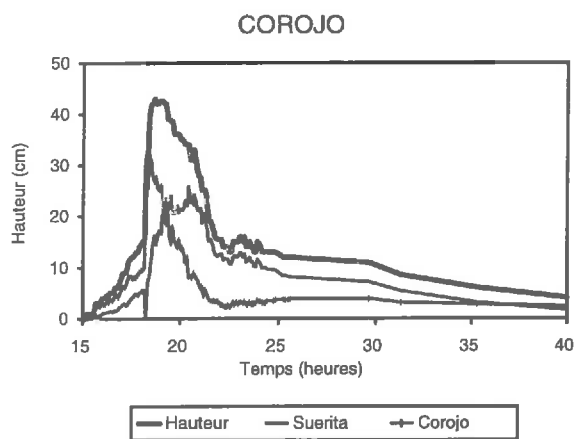


Figure V.10: Essai de décomposition semi-quantitative du limnigramme de la Quebrada Corojó à partir de la conductivité électrique (crue du 09 au 10 juillet 1995).

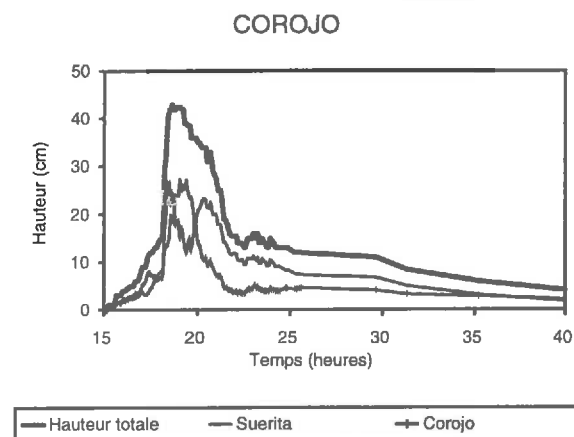


Figure V.11: Essai de décomposition semi-quantitative du limnigramme de la Quebrada Corojó à partir de SO_4 (crue du 09 au 10 juillet 1995).

Pour ces eaux, l'alcalinité constitue l'anion principale, le sulfate étant secondaire. Ainsi, le sulfate et la conductivité électrique sont *a priori* indépendants. Aussi, afin de comparer avec la conductivité électrique, une décomposition a été réalisée avec le sulfate.

La décomposition semi-quantitative réalisée avec le sulfate (Fig. V.11) confirme les résultats obtenus en utilisant la conductivité électrique. Lorsque la montée progressive des eaux survient, la proportion des eaux de la Corojó est en légère diminution mais pendant la vague d'eau le débit de Corojó prédomine. Ces eaux sulfatées continuent de prévaloir un certain temps pendant le pic de crue; mais lorsque l'épaule de la décrue apparaît les

proportions de flux s'inversent et c'est alors la Suerita, avec des eaux moyennement concentrées voire diluées, qui livre l'essentiel du débit. Le scénario observé dans la première décomposition, à savoir, l'intervention des deux affluents qui forment la Suerita, est également constaté ici. La prédominance des eaux de la Suerita se prolonge jusqu'au tarissement de la crue.

Le groupe chlorure, potassium et pCO₂

Ce groupe disparate est statistiquement opposé à l'ensemble des paramètres discutés dans le paragraphe précédent. Il s'agit des éléments marqueurs de surface ou de différenciation surface/profondeur.

La pCO₂ a été calculée pour la crue du 9 et 10 juillet 1995; c'est un paramètre qui permet de mettre en évidence l'opposition surface/profondeur et aussi de confirmer l'origine géographique des eaux. Au début de la crue, les eaux sont pauvres en CO₂ et présentent de fortes teneurs d'alcalinité (Fig. V.12); elles proviennent probablement d'un réservoir profond correspondant à l'altération des roches cristallines.

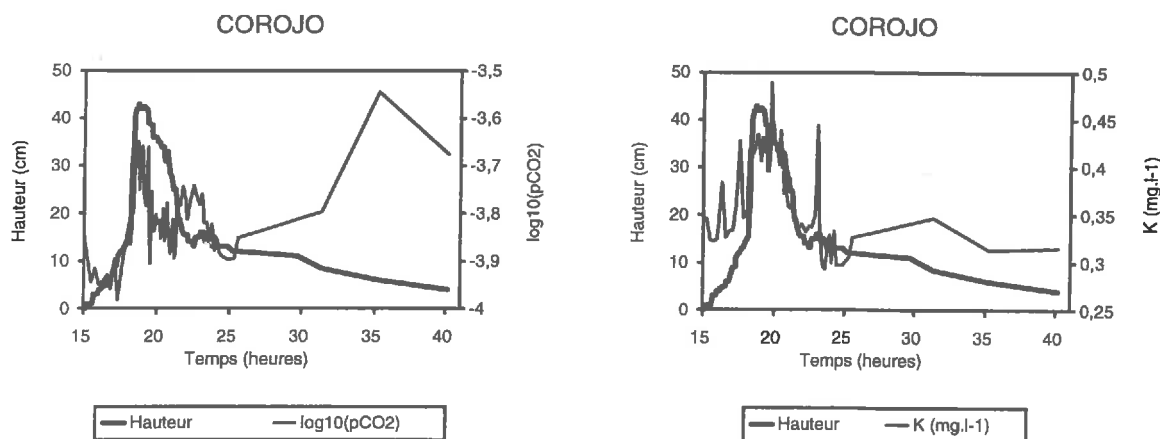


Figure V.12: Variations temporelles de la pCO₂ (a) et de la teneur en potassium (b) lors de la crue du 9-10 juillet 1995.

Pendant l'arrivée de la vague et jusqu'à l'épaule de la décrue, la pCO₂ augmente fortement, mais à la différence des autres paramètres, ce pic est plus étalé et plus stable dans le temps. Un nouveau réservoir apparaît, caractérisé par des eaux un peu plus riches en CO₂; il s'agit d'une onde d'eau originaire du Corojó, riches en matériau lutitique. Comme pour les Jarillos, le mécanisme responsable de cet enrichissement serait l'oxydation du carbone organique présent dans ce matériaux; ceci sera confirmé dans le paragraphe suivant par l'étude de M.E.S et du carbone organique. Lorsque survient l'épaule dans la décrue, la pCO₂ chute brutalement; ceci coïncide avec les deux composantes de la Suerita mise en évidence par la décomposition avec la conductivité électrique et le sulfate. Il s'agit des eaux d'altération des roches cristallines qui utilisent le CO₂ pour la formation de l'alcalinité carbonatée. Dans la phase de tarissement, les eaux continuent à s'appauvrir en CO₂ montrant ainsi un changement de réservoir. Les valeurs obtenues s'approchent fortement des celles du début de la crue.

Le chlorure demeure stable pendant la crue. Les très faibles concentrations observées peuvent être reliées à son origine atmosphérique. Du fait des faibles teneurs, les variations sont du même ordre de grandeur que l'imprécision analytique. La stabilité observée pour ce paramètre tout au long de la crue est légèrement perturbée dans la dernière phase de la décrue, lors de petit pic de débit. A ce stade de la crue, la teneur en chlorure augmente légèrement, ce qui pourrait traduire la contribution d'une eau ancienne légèrement concentrées par évapotranspiration. Ce résultat confirme la remontée de $\delta^{18}\text{O}$ observée durant cette période. et qui traduit une contribution d'eau préexistante.

Le potassium est le seul paramètre dissous marqueur du réservoir de surface, car il est comparable aux paramètres à phases solides. En revanche, il est opposé aux autres paramètres dissous; lorsque le débit augmente, la teneur en potassium aussi. Chaque augmentation de ce paramètre, quelle soit importante ou non, est accompagnée d'une montée de débit. Il se présente toujours avant l'arrivée des pointes de débits; ce qui tend à montrer que cet élément est abondant dans le bassin versant et qui concerne les réservoirs superficiels. Ce comportement est assez similaire à celui des matières en suspension. Malgré sa faible concentration, ce paramètre confirme l'existence d'un ruissellement; puisque les deux premiers pics dans la montée progressive des eaux sont étroitement liés au réservoir Corojó. Les écoulements riches en potassium qui apparaissent dans cette partie de la crue peuvent être reliés aux cultures environnantes au site de prélèvement, et donc aux flux superficiels. La plus importante teneur en potassium n'est pas associée à la vague d'eau, comme c'est le cas pour les autres paramètres chimiques de cette crue. Ici, elle coïncide avec l'épaule observé pendant la décrue et concerne les deux branches de la Suerita qui sont alimentées par les zones cristallines d'altitude. Cet enrichissement peut s'expliquer par deux manières, la première par l'altération de feldspath potassiques abondants dans les roches cristallines et la deuxième par la présence de cultures dans ces zones de haute montagne. Lors du tarissement une augmentation des teneurs en potassium se manifeste, comme pour la phase de l'épaule de la décrue, ces concentrations peuvent être liées aux deux sources préalablement mentionnées.

5.2.4. Evolution de phases solides: le taux de matière en suspension (M.E.S.), la granulométrie et le carbone organique particulaire(C.O.P.)

Lors de la crue, les taux de M.E.S ont été suivis, car ils constituent un important paramètre pour établir des bilans d'exportation occasionnés par l'érosion mécanique, voire pour être utilisés comme marqueurs spécifiques pour un bassin versant. L'étude de la crue des Jarillos a aussi montré que les M.E.S. peuvent se comporter comme marqueurs de l'eau. Pour le bassin versant de Corojó l'étude de M.E.S. sera abordée par un suivi du taux de sédiments, le fractionnement granulométrique, le taux de C.O.P., le marquage isotopique $\delta^{13}C$, et le rapport C/N.

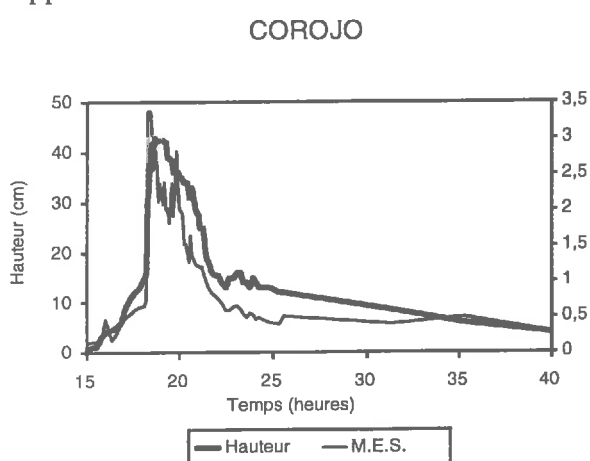


Figure V.13: Variations du taux de MES lors de la crue du 9-10 juillet 1995 du torrent Corojó

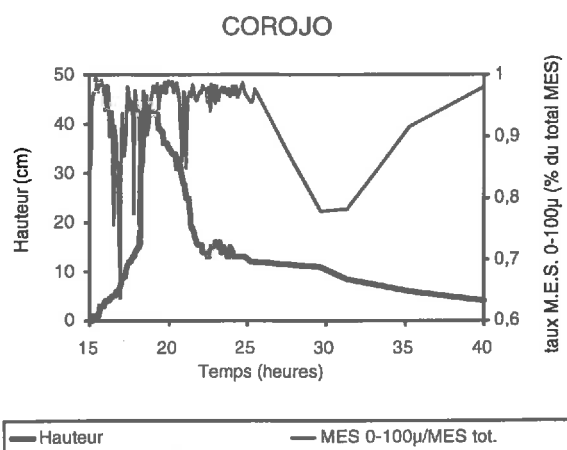


Figure V.14: Variations du taux de matières fines (diamètre <100µm) dans les MES du torrent Corojó lors de la crue du 9-10 juillet 1995.

Les taux de M.E.S. sont considérables car ils atteignent $3,5 \text{ kg.m}^{-3}$ au maximum de crue (fig. V.13). En comparant, l'évolution de M.E.S. et le limnigramme, il apparaît qu'à chaque augmentation de débit ou l'apparition d'un épaulement, le taux de matières en suspension augmente; ce paramètre rappelle assez bien le comportement du potassium. A chaque augmentation de débit correspond un pic de M.E.S. Ce synchronisme va traduire très probablement la contribution d'un réservoir superficiel lors des croissances de débit, cette hypothèse sera confortée par les autres paramètres traçant les écoulements de surface.

La montée progressive des eaux est accompagnée par un premier pic très modeste de M.E.S., mais qui montre une certaine stabilité et une contribution modérée. En revanche, avec l'arrivée de la vague d'eau le taux de M.E.S. atteint son maximum. Dans cette étape, l'onde est très brève et transporte sa propre charge solide, mais aussi les dépôts qui ont été laissés sur le lit du torrent lors des anciennes crues. Lorsque la vague s'achève les taux de M.E.S. diminuent pour attendre l'épaulement. Dans cette nouvelle phase, les teneurs en solides augmentent à nouveau mais toujours de manière très soudaine.

La localisation des pics de M.E.S. dans le limnigramme ainsi que leur teneur permet la différenciation des différentes ondes d'eau. A partir du deuxième pic de débit lors la décrue s'observe un parallélisme remarquable entre la courbe de hauteur d'eau et celle du M.E.S.

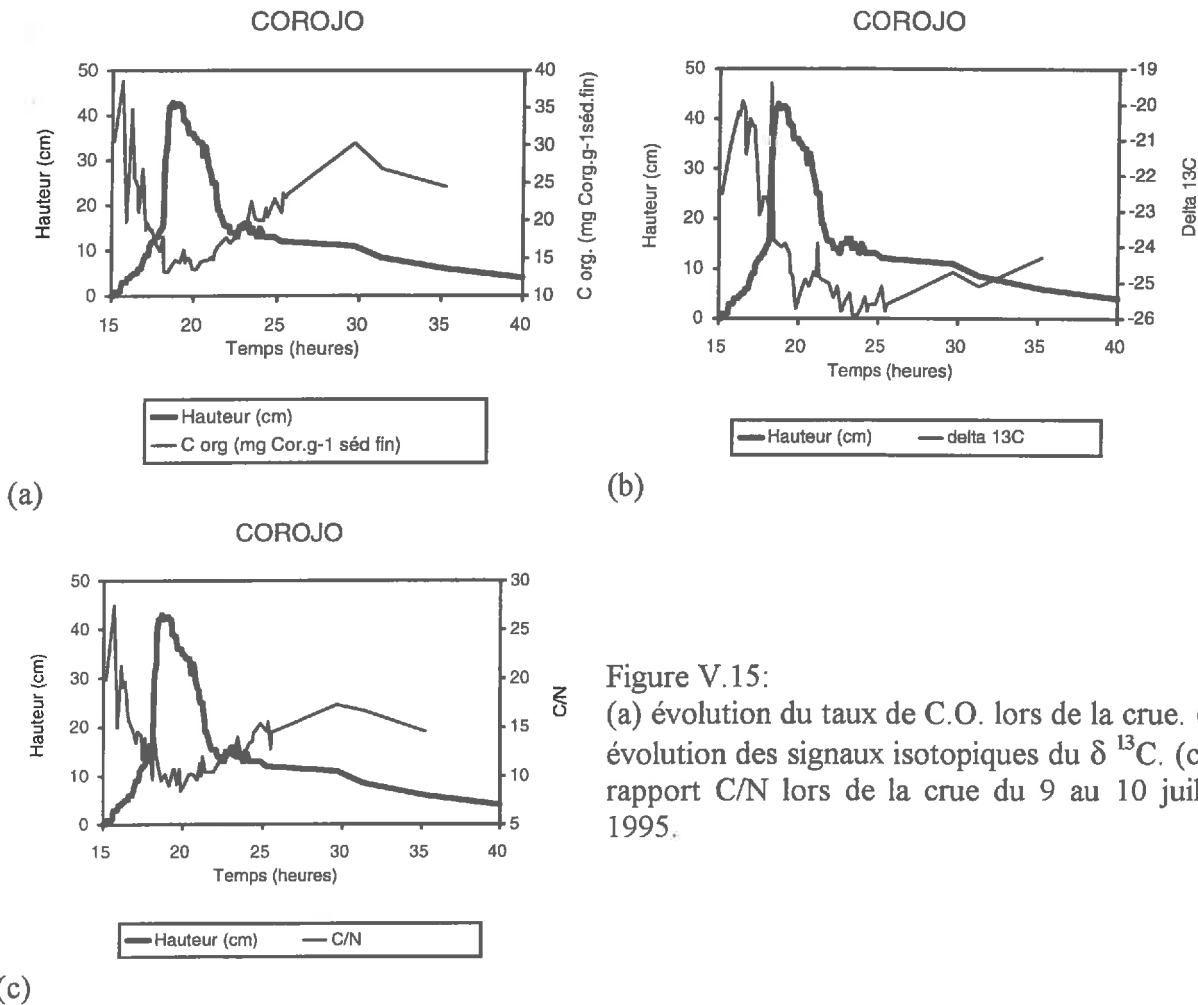


Figure V.15:
 (a) évolution du taux de C.O. lors de la crue. (b) évolution des signaux isotopiques du $\delta^{13}\text{C}$. (c) le rapport C/N lors de la crue du 9 au 10 juillet 1995.

L'étude des classes granulométriques a été réalisée afin de mieux déceler le type de matériaux transportés pendant la crue. La crue est caractérisée par deux fractions de $0-100\mu\text{m}$ (fines) et $100-200\mu\text{m}$ (grossières) dont la première est majoritaire (fig.V.14). La montée progressive du débit comporte ces deux fractions. La première celle de $0-100\mu\text{m}$ prédomine tout au début de cette phase, est associée aux réservoirs superficiels riches en matériau

provenant de la litière ou des horizon humiques. Le potassium confirme le caractère superficiel du réservoir, de même que le suivi du C.O.P. qui sera traité dans le paragraphe suivant. La deuxième fraction est caractérisée par une importante arrivée des sédiments grossiers, très probablement mobilisé des anciens dépôts laissés sur le lit du torrent par des crues passées. Ce comportement à double classe granulométrique au montée progressive des eaux se retrouve dans le bassin versant de Jarillos. La vague d'eau est marquée par la fraction grossières. Compte tenu de la violence de la vague et du charriage de blocs observé sur le terrain, il est fort probable que un charriage important de sédiments à taille centimétrique aurait eu lieu. L'origine des ces flux concernent des réservoirs profonds. Il pourrait s'agir aussi des arrachements sur les pentes qui traduisent une érosion incisive. Après cette phase, l'épaulement apparaît et les apports de sédiments fins se rétablissent, car les vitesses diminuent. Pour ce torrent, il existe une concomitance entre les fortes débits et les maxima de M.E.S. Une nouvelle augmentation de classe 0-200 μ m surgit lors du premier pic de débit de la décrue, ceci confirme la concomitance entre débit/M.E.S. Ce mécanisme révèle aussi l'effet de «chasse d'eau», traduit par le déplacement du matériau par le front de la vague. Ce mécanisme est dépendant de la capacité hydraulique de la vague considérée ce qui peut expliquer la mise en circulation des différentes fractions granulométriques. Le tarissement se caractérise par des matériaux plus grossières.

Le carbone organique particulaire a été analysé sur un ensemble de 58 échantillons. Les données sont assez précises car les sédiments contiennent suffisamment de matière organique; ceci est particulièrement vrai pour le rapport C/N dont les variations sont significatives.

Pour la montée progressive du débit (Fig. V.15), ce paramètre montre l'arrivée de matériel riche en C.O.P. frais car le rapport C/N est égal à 25; la signature $\delta^{13}\text{C}$ est de -20 ‰. Ces valeurs indiquent plutôt un mélange composé de litière forestière et de culture. Le taux de C.O.P. est élevé avec plus de 35 mgr/gr de sédiments fins (0-200 μ m). Les caractéristiques de la classe granulométrique transportée et le type de matériau charrié suggèrent la participation d'un réservoir de surface. Le site de mesure fait partie de la forêt de moyenne montagne et les champs de cultures de maïs et de canne à sucre sont très nombreux.

Quelques heures avant le débit de pointe les taux de C.O.P. diminuent considérablement jusqu'à 20 mgr/gr de sédiments fins. Une tendance semblable apparaît sur les deux autres paramètres. Le matériau transporté dans cette phase est grossier et pauvre en matière organique car les taux de C.O.P. diminuent brusquement jusqu'à 20 mgr/gr de sédiment fin et il survient une légère diminution de la signature isotopique du $\delta^{13}\text{C}$. Cette phase indiquerait la contribution d'un compartiment plus humique, cette particularité met en évidence un déplacement du flux depuis la surface (moins de litière) vers la profondeur (plus d'humus). A partir de ce moment là et pendant toute la phase de pointe de crue, les taux de C.O.P. sont les moins importants de toute la crue, cet effet coïncide avec les apports plus importants de la classe granulométrique 0-200 μ m. Ils sont moins riches en matière organique car les apports humiques diminuent et le rapport C/N se situe aux environs de 8. La contribution du carbone proviendrait de la réserve fossile des lutites pyriteuses, avec une signature de $\delta^{13}\text{C}$ égale à -26‰. Contrairement aux deux premières étapes qui sont typiques d'une érosion de nappe ou de surface, dans cette partie de la crue il s'agit d'une érosion incisive qui attaque le fond du torrent et des berges, ceci est confirmé par les observations pendant l'épisode où les écoulements très violents étaient capables d'occasionner le dépavage du lit et la mobilisation des blocs. Cette situation persiste pendant les écoulements violents à savoir: la vague, le pic de crue et l'épaulement. A partir du deuxième pic de débit lors de la décrue le taux de C.O.P. augmente ainsi que le rapport C/N qui se rapproche à nouveau des valeurs typiques d'humus évolué. Ceci se traduit aussi par une remontée légère et progressive du $\delta^{13}\text{C}$, il s'agirait d'un horizon humique probablement d'origine lointaine. Il est difficile de préciser s'il s'agit d'humus

provenant du páramos (hautes altitudes) ou bien d'un mélange d'humus de forêt et des zones cultivées.

Synthèse sur la crue de Corojó

Au début de l'épisode du 9 au 10 juillet 1995, le débit augmente progressivement à l'exutoire de bassin versant. Ces flux sont constitués essentiellement par de l'eau préexistante et chaude originaire des zones basses des bassins de Corojó et de Suerita. Pour cette première phase de la crue, l'évolution des proportions entre les débits des deux affluents au profit de la Suerita a été confirmée. Alors, les MES sont composés de matériaux minéraux et organiques provenant de la surface avec une texture fine, un fort taux de matière organique issue d'un mélange de litières de forêt et de cultures de maïs situées à proximité de l'exutoire. A la fin de cette phase d'augmentation progressive de débit, le torrent commence à mobiliser des matériaux moins organiques et plus grossiers initialement présents dans le lit.

Subitement, la vague d'eau provenant de l'affluent Corojó arrive de manière particulièrement violente. Cette arrivée brusque est probablement liée à la structure hydrographique du torrent qui est comparable à une «arête de poisson» avec un axe principal rectiligne très pentu et des affluents formant des angles droits avec ce dernier. Le taux de M.E.S. atteignent jusqu'à 3 gr/l; constitués par des matériaux lutitiques plus grossiers (classe 0-200 μm) qui ont été arraché par le torrent au lit. Ces eaux sont constituées d'un mélange entre les apports de la pluie, froide, aérée et diluée, et les apports d'eau préexistante, chargée en CO_2 concentrée et chaude. Pour ces eaux, la charge dissoute atteint alors les concentrations maximales de la crue. La contribution de la quebrada Corojó se tarit presque aussi rapidement qu'elle survient. La phase suivante dans l'hydrogramme montre alors l'arrivée de deux vagues successives provenant de la Suerita. Elles correspondent aux deux tributaires qui composent l'affluent Suerita, *sensu stricto*, caractérisés par un réseau hydrographique dendritique ce qui induit des écoulements moins violents, plus étalés; leur contribution est plus progressive que pour la branche Corojó. Cette partie de la crue mobilise des eaux plus froides et diluées car leur origine est localisée en haute altitude (páramos). La composante eau de pluie est alors prédominante.

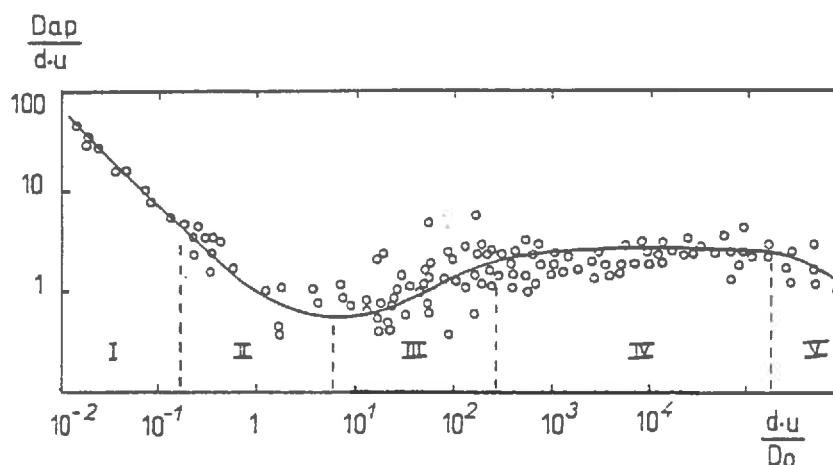


Figure V.16: Variations du coefficient de dispersion apparent selon la vitesse de l'eau (D'après Pfannkuch, 1964).

Pour conclure, il faudra retenir que chaque vague d'eau est précédée d'un front de M.E.S., ce résultat est comparable à celui observé par Olivry *et al.*, (1993), pour des grands affluents de l'Amazonie dont l'amont est situé dans la partie andine du bassin. Pour le Corojó

les M.E.S. proviennent de surface (érosion en nappe) puis de la profondeur liée à une érosion incisive provoquée par les fortes vitesses atteintes dans le torrent.

Lorsque les flux se tarissent les caractéristiques hydrochimiques évoluent lentement vers leur état initial, bien que la signature des différents réservoirs semble avoir été affectée par l'effet de dilution de la pluie.

Dans ce milieu très torrentiel, l'atténuation des signaux chimiques et particuliers était à craindre. Cependant, les observations réalisées sur ces différents paramètres physico-chimiques montrent qu'il n'en est rien. Les variations temporelles sont au contraire très marquées. L'effet d'atténuation est réduit malgré les fortes vitesses d'écoulement. Cette faible dispersion constatée pour de fortes vitesses peut surprendre. Cependant, Pfannkuch (1964) (fig. V.16), montre l'existence de cinq régimes de diffusion des solutés en fonction de la vitesse. D'abord lorsque les vitesses sont faibles la dispersion se réduit à la diffusion moléculaire, ensuite et au fur à mesure que la vitesse augmente, c'est la dispersion mécanique qui s'impose. Enfin, un effet de vague apparaît dans un cinquième régime correspondant aux fortes vitesses; à ce niveau, le coefficient de dispersion apparent cesse de croître et diminue quelque peu. Ceci peut s'expliquer par exemple par la disparition de la distribution parabolique des vitesses depuis les zones de contact avec les parois vers le centre des écoulements. Dans le cas du torrent Corojó, comme les vitesses d'écoulement sont élevées, ce cinquième régime est probablement atteint. Cette hypothèse d'effet de vague peut être envisagée pour expliquer le transferts du flux dissous et particulaire dans ce bassin versant qui présente une faible atténuation des signaux.

De façon plus simple, l'atténuation d'un signal chimique peut se produire lorsque la crue est constituée d'un mélange d'eaux dans des proportions peu variables. Or la forte structuration morphologique, tant en terme de pente que de structure du réseau hydrologique, conduit à une forte disparité des temps de réponse entre les sous bassins. Les eaux provenant des différents secteurs se succèdent dans les points de confluence. N'arrivant pas en même temps, elles ne peuvent se mélanger, ce qui induit de fortes variations temporelles des signaux.

Conclusions sur le torrent Corojó

L'analyse des paramètres chimiques, isotopiques et particuliers pour cette crue a permis de distinguer les origines de l'eau et de la charge en suspension pour le torrent de Corojó. Les informations véhiculées par ces paramètres sont riches. Des informations parfois indépendantes se confirment comme c'est le cas pour la conductivité électrique et le sulfate ainsi que pour la complémentarité entre la pCO_2 et le carbone organique particulaire. En effet, ce caractère double de l'information a permis de préciser les origines géographiques de l'eau en fonction de sous-bassins, selon leurs hydrographies et leurs altitudes; il a aussi été possible de confirmer les contributions respectives de réservoirs superficiels et profonds et d'établir une opposition entre eau préexistante et eau nouvelle.

L'atténuation des signaux qui était à craindre à cause de la surface de Corojó ne s'est pas produite. Les caractéristiques hydrochimiques présentent bien au contraire de fortes variations lors de la crue. Ce phénomène, s'explique en partie par l'hétérogénéité des vitesses de transfert des différents sous bassin induisant l'arrivée d'ondes d'origines et de signatures différentes successivement à l'exutoire. Cette arrivée par vagues successives ne permet pas un mélange entre les eaux provenant des différentes réservoirs. Ce mécanisme explique les fortes variations des paramètres physico-chimiques.

De plus le réseau hydrographique présente de grandes différences entre les deux sous bassins contributifs, Corojó et Suerita. Deux structures hydrographiques s'opposent; la première en «arête de poisson» typique de l'affluent Corojó induit des écoulements très rapides parce que les distances parcourues sont courtes et les trajectoires rectilignes; la deuxième structure est du type dentritique caractéristique du sous bassin la Suerita qui induit des

écoulements moins rapides. Ainsi, le bassin versant du Corojó, avec ces deux branches bien différenciées hydrologiquement, est particulièrement approprié à ce type d'étude.

L'effet de vague caractéristique des fortes vitesses de l'eau a été aussi envisagé pour expliquer aussi la faiblesse de l'atténuation des signaux chimiques. Lorsque les vitesses sont particulièrement élevées $0,94 \text{ m.s}^{-1}$ ($3,4 \text{ km.h}^{-1}$) dans des chenaux relativement étroits, elles induisent une faible dispersion mécanique pour les fortes vitesses de transfert.

Des taux de M.E.S. particulièrement élevés ont été atteints pendant le pic de crue, atteignant 3 g.l^{-1} , ce qui est conforme aux valeurs publiées pour des flux concentrés; la phase de laves boueuses n'est pas atteinte dans ce cas, notamment à cause de la texture granulaire des matériaux transportés.

Le taux de matières en suspension et le débit sont fortement corrélés. La succession des vagues d'eau provoque une succession de pics du taux de M.E.S. Le marquage par le carbone organique et les isotopes ^{13}C a permis de suivre tout au long de la crue la participation de différents compartiments organiques et de les localiser. Le suivi en C.O.P. a montré que les M.E.S. proviennent tout d'abord de la surface; elles proviennent alors des litières. Le C.O.P. d'origine humique traduit ensuite la contribution d'horizons de sub-surface. Enfin, l'arrivée de matériel fossile moins riche en carbone, d'origine plus profonde correspond à une érosion incisive probablement dans le chenal ou les ravines. Le C.O.P. présente alors un signal isotopique en ^{13}C typique des roches lutitiques.

Cette succession de réservoirs du plus superficiel vers le plus profond est remarquable. Ainsi, grâce au fort contraste spatial du C.O.P. dans ce milieu, il a été possible d'établir une hiérarchisation des flux. Tout d'abord, les flux de M.E.S. sont superficiels et rapides; ils sont donc les plus précoces; il s'agit aussi de matériau fin. Finalement les flux de M.E.S. profonds qui sont plus tardifs, moins rapides. Ils sont associés aux forts débits et correspondent à la fraction granulométrique des éléments grossiers.

Par rapport au torrent los Jarillos, le Corojó présente une tendance comparable. D'abord, la forte réactivité du milieu est caractéristique et comparable pour les deux torrents. Dans Corojó, les précipitations sont plus importantes que pour la crue des Jarillos, mais l'ordre d'arrivée et l'origine des écoulements présentent des similitudes. Ainsi, à titre d'exemple, pour los Jarillos comme pour Corojó les flux superficiels et pauvres en CO_2 sont ceux qui contribuent de manière quasiment instantanée.

CONCLUSION

À l'occasion de ce chapitre, deux crues très différentes ont été étudiées; la première est liée à un petit épisode pluvieux sur le torrent de Jarillos et la seconde est représentative de la moyenne du bassin de Boconó.

La variabilité spatiale des paramètres chimiques et isotopiques observées à l'échelle du bassin versant (chapitre IV) a été retrouvée dans ce suivi temporel. Elle s'exprime par une forte variabilité temporelle pour toute la gamme de paramètres chimiques et isotopiques suivis.

Pour los Jarillos la forte réactivité hydrologique du milieu conduit à des temps de transfert rapides malgré les faibles précipitations.

Le principal mécanisme à retenir dans cette étude qualitative des crues est lié aux vitesses rapides et différentes des écoulements selon la topographie et la morphologie du réseau hydrographique. Ces vitesses sont fortement liées au type de structure hydrographique du sous bassin concerné. Une structure dendritique provoque des vitesses moins rapides et donc de vagues moins violentes plus étalées (caractère dispersif plus importante). Une structure en «arête de poisson» induit de vitesses très rapides et occasionne des vagues plus violentes et brèves.

L'hétérogénéité des pentes entraîne donc une succession de vagues à différentes signatures qui arrivent à l'exutoire de manière individualisées. Grâce à ce processus, il est possible de reconstruire l'hydrodynamique des torrents car les signaux chimiques, isotopiques et des phases solides n'ont pas subi d'atténuation pendant le transfert.

Ce chapitre a permis aussi de mettre en évidence une grande diversité de mécanismes hydrologiques dont la plupart sont souvent cités dans la littérature:

- alimentation de la nappe par l'eau de pluie
- contribution importante des nappes ou de l'eau du sol à l'alimentation de rivière.
- présence des plusieurs écoulements superficiels: écoulements de surface, écoulements de subsurface dans les horizons organiques.
- de même existence de plusieurs types d'érosion: érosion de surface, érosion des horizons organiques, érosion incisive.
- le lien entre la lithologie et le type d'érosion.

Au niveau méthodologique, c'est grâce à la diversité des traceurs et marqueurs utilisés pour le suivis de la chimie des éléments dissous, des isotopes et matières en suspension qu'il a été possible de montrer l'existence d'un tel nombre de mécanismes.

Par ailleurs, la comparaison entre les deux torrents a révélé une certaine stabilité dans la typologie des traceurs et des marqueurs. Ainsi, le groupe de traceurs constitué par la conductivité électrique, le sulfate, l'alcalinité carbonatée et le calcium semble opposer systématiquement les zones lutitiques aux eaux provenant des sols se développant sur roches cristallines. Sur les deux bassins versants étudiés ces éléments semble avoir une origine profonde. En revanche, le sodium et le chlorure identifient les apports atmosphériques dans les bassins versant. Par ailleurs, le potassium et le taux de M.E.S. sont les marqueurs de la surface, au même titre que la pCO_2 .

Une opposition géographique et verticale a donc été possible en utilisant comme traceur un paramètre de la phase gazeuse: la pCO_2 . Ce paramètre peu cité dans la littérature s'avère être très utile aussi bien pour les Jarillos que sur le Corojó.

Le suivi du carbone organique a été particulièrement utile pour déterminer l'origine spatiale et verticale des M.E.S. et pour les caractériser. Par ailleurs, le $\delta^{18}O$, isotope stable de l'eau, montre l'existence de contributions non négligeables à la fois de l'eau nouvelle et de l'eau préexistante.

Dans ce chapitre, le traçage et le marquage des eaux a été possible à deux échelles différentes de bassins. Ce résultat est lié à l'organisation spatiale bien structurée et aux forts contrastes du milieu. Cette démarche utilisée avec succès à l'échelle des quelques kilomètres carrés ou dizaine de km^2 donnera-t-elle le même résultat à l'échelle de plusieurs centaines voire de milliers km^2 ? Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE VI

ÉTUDE ET MODÉLISATION DES MÉCANISMES DE TRANSFERT DANS LES BRANCHES BOCONÓ ET BURATE: BILAN DES EXPORTATIONS DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES

Les mécanismes développés sur les fortes pentes ont été traités dans le chapitre précédent. Ils concernaient à la fois des transferts à la surface du sol et la concentration des flux dans le lit des torrents jusqu'à leur débouché dans le Burate et le Boconó.

Ce chapitre est consacré à l'étude des transferts d'eau, de solutés et de matières en suspension issus de ces torrents, dans les branches principales du réseau hydrographique. L'objectif principal sera la caractérisation des processus survenant entre la confluence des torrents avec le Burate ou le Boconó et l'exutoire représenté par l'entrée dans le barrage.

Contrairement au chapitre précédent, la démarche envisagée ici sera quantitative. Les surfaces plus importantes que celles des sous bassins étudiés précédemment, concernées seront de l'ordre de la centaine voire du millier de kilomètres carrés. La détermination des bilans d'exportation de matière dissoute et particulaire pourra être envisagée grâce à la calibration des débits d'eau sur les points de mesure.

Par ailleurs une tentative de bilan décennal des exportations de M.E.S. sera tentée à partir de la vitesse d'ensablement du barrage situé à l'aval du bassin.

Enfin, pour apprécier la validité des interprétations sur les mécanismes de transferts, une simulation des flux d'eau, de soluté et de M.E.S. sera tentée à l'échelle d'une crue.

6.1 Etude d'une crue moyenne du río Burate: épisode du 09-10 juillet 1995.

L'épisode étudié est le même que pour le torrent Corojó, c'est à dire celui de la nuit du 9 au 10 juillet 1995. L'estimation de la hauteur des précipitations a été réalisée à partir de l'ensemble des stations qui constituent le réseau météorologique du bassin, à savoir: las Mesitas, Niquitao, Tostós et le páramo Guaramacal (chapitre III).

Les résultats (fig. VI.1) indiquent une hétérogénéité spatiale de la pluie, en termes de quantité précipitée seulement, la pluie étant relativement synchrone sur l'ensemble des stations du bassin versant du Burate. Les pluies sont plus importantes sur le versant Guaramacal que sur le versant opposé. Elles sont aussi plus importantes à l'est du bassin (aval du Burate) qu'à l'ouest (amont du Burate).

Le suivi hydrologique et l'échantillonnage de cette crue a été réalisé une centaine de mètres avant la confluence avec Boconó.

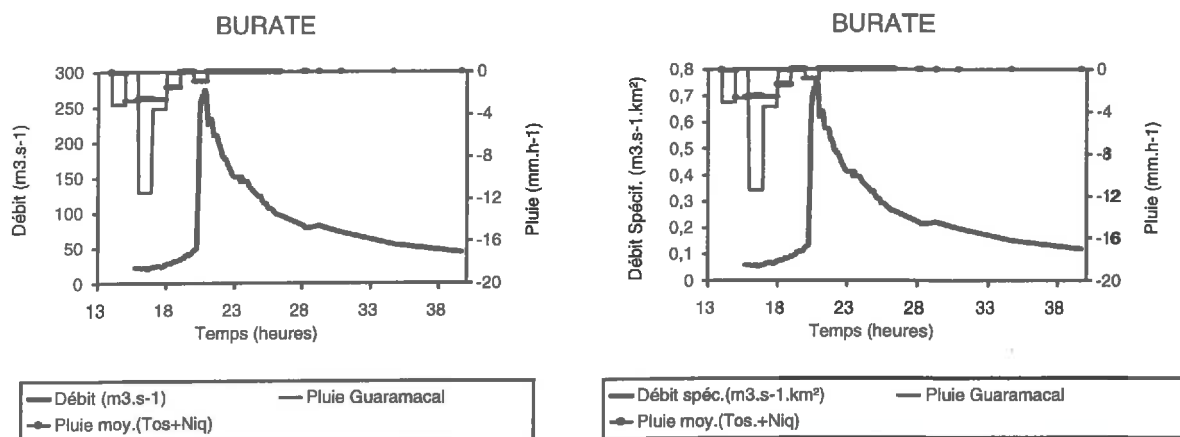
Bien qu'il n'existe pas d'étude de typologie des crues du Burate, il est permis de penser que, comme pour la branche Boconó, cette crue constitue un épisode moyen, de fréquence annuelle. Les débits ont pu être calculés à partir des hauteurs d'eau relevées ainsi que de l'intercalibration réalisée à partir des mesures simultanées de l'équipe de Velásquez (Chapitre III).

Le volume total écoulé est de 7,09 millions de m³, ce qui représente en moyenne 18,9 mm sur les 374 km² du bassin versant. Ces valeurs seront comparées à celles de la branche du Boconó dans le paragraphe correspondant.

6.1.1 Etude de l'hydrogramme

L'hydrogramme unitaire du río Burate (fig. VI.1) présente de nombreuses similitudes avec le torrent Corojó et notamment la rapidité de réaction du bassin. En effet, le temps de

réaction est d'environ 3 heures, contre 1h30 pour Corojó, ce qui est relativement bref compte tenu de la surface du bassin versant.



(a)

(b)

Figure VI.1: Hydrogramme et pluviogrammes de Burate. pour la crue du 09 au 10 juillet 1995. (a) Hydrogramme en débit. (b) Hydrogramme en débit spécifique.

Comme pour le torrent Corojó, plusieurs parties s'individualisent dans l'hydrogramme. La première partie est représentée par la montée progressive du débit; elle s'étale entre 15h30 et 19h45. La deuxième partie concerne l'arrivée de la vague excessivement brutale, puisqu'elle dure 1 minute, ce qui constitue une autre similitude avec le torrent précédemment étudié. Le débit de pointe se maintient entre 20h00 et 20h30, soient environ 30 mn avec un flux qui atteint les $270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

En décrue, l'hydrogramme présente quatre phases bien différenciées. La première est constituée par une chute rapide des débits qui passent de $270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 10 mn. La décrue se ralentit alors; les débits passent de 220 à $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre 21h30 et 23h30 ce qui représente la deuxième phase. La troisième partie de la décrue est marquée par une rupture de pente dans l'hydrogramme, ce qui traduit l'instauration d'un nouveau régime entre 23h30 et 04h00. Les débits ont alors fortement diminué puisqu'il se stabilisent aux environs de $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Enfin la dernière phase concerne le tarissement très lent avec des débits de l'ordre de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; elle se maintiennent encore plus de 10 heures.

La rapidité de la montée de crue et le temps de réaction rapide constituent une similitude avec le torrent Corojó. Le temps de concentration des flux sur les pentes mesuré sur Corojó est d'environ 1h30. Le temps de réaction de Burate est de 3h00. Le temps de propagation de l'onde dans le réseau Burate peut être estimé à 3h00 moins 1h30 soit 1h30. Les secteurs d'alimentation les plus proches sont situés à une distance minimale de 8-13, km ce qui impose des vitesses de transfert de $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ minimum dans le lit du Burate. Ce résultat montre que les vitesses dans le bassin du Burate sont très rapides, car ce bassin versant présente une axe principal encaissé dans une zone de faille de trajectoire droite. Les affluents provenant des versants montrent un parcours semblable au lit du Burate, ce qui induit des écoulements rapides et directs. Les secteurs qui présentent cette organisation hydrographique sont le haut Burate et le versant nord de Guaramacal (Vitisay, Jarillos).

Pour mieux comprendre ce temps de transfert du Burate, une comparaison entre les profils de pentes des torrents (los Jarillos et la Corojó) et les deux branches principales a été réalisée (*c.f.* chapitre II). Une différence importante entre les pentes de ces deux régimes peut expliquer le temps et la célérité du transfert d'eau. Les pentes plus importantes pour les torrents expliqueraient les temps de transfert rapides et violents observés; ce type de pentes sont aussi rencontré dans la partie amont de Burate. Ainsi que, pour le Boconó les pentes sont moins inclinées, même il existe de zones de vallées et le temps de transfert est plus importants (les différents temps de transfert seront affinés lors de la modélisation, *c.f.* au paragraphe 6.7).

Toutes ces caractéristiques font du Burate un gros torrent et non une rivière. Cette affirmation sera confirmée ultérieurement par le comportement particulier des matières en suspension.

6.1.2 Evolution des éléments dissous: caractéristiques géochimiques des eaux.

Une étude statistique et géostatistique, sur l'ensemble des 53 échantillons d'eau, pour lesquels anions et cations ont été analysés, a permis de connaître l'évolution des éléments majeurs dans la crue du Burate. Le faciès chimique varie peu sur l'ensemble de la crue (annexe I).

L'A.C.P. présente un premier plan factoriel avec des axes montrant respectivement 58,0% et 35,3% de la variance. Trois groupes principaux s'individualisent: un premier groupe constitué par le potassium, le calcium et l'alcalinité carbonatée; la conductivité électrique est bien corrélée aux paramètres de ce premier groupe. Le deuxième formé par le magnésium et le sulfate. Enfin le groupe du sodium et chlorure présente des variations comparables à $\delta^{18}\text{O}$ et à la température. Une bonne corrélation est apparue entre les M.E.S. et le potassium. Par ailleurs, d'autres paramètres ont été pris en compte pour l'étude des mécanismes de transfert. C'est le cas de l'alcalinité résiduelle calcite, le pH et la pCO_2 qui seront traités en dernier.

Le groupe de la conductivité électrique, du potassium, du calcium et de l'alcalinité carbonatée

La conductivité électrique, le calcium, le potassium et l'alcalinité sont fortement corrélés entre eux. Ils véhiculent donc la même information. La conductivité électrique, représentative de ce groupe, sera seule discutée.

L'évolution de la conductivité électrique (fig. VI.2) est assez différente de celle observée précédemment pour la quebrada Corojó. Dans le cas du río Burate, l'augmentation des débits s'accompagne d'un accroissement de la teneur en éléments dissous. Comme pour la quebrada Corojó, ces variations ne s'accordent pas du tout avec le schéma de dilution d'une eau préexistante par l'eau de pluie. Les résultats obtenus varient exactement à l'opposé de ce schéma, autrement dit, en début de crue, les concentrations sont faibles et quand le débit de pointe survient les concentrations sont maximales.

La montée progressive de débits entre 15h00 et 20h20 mobilise des eaux de faible conductivité. Les valeurs observées, voisines de $100\text{-}120 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, sont caractéristiques des zones de haute altitude qui semblent donc alimenter le régime de base. Lorsque la vague d'eau arrive à 20h30, la conductivité électrique présente les valeurs maximales de l'épisode. Cependant, ce maximum est légèrement différé par rapport au débit de pointe. Les valeurs se situent alors aux environs de $250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ce qui est très proche des mesures effectuées dans los Jarillos, affluent des zones acides. Ainsi, l'origine de l'eau constituant cette vague doit être attribuée au secteur Vitisay qui est relativement proche du point de mesure. Le décalage entre les maxima de conductivité électrique et de débit peut s'expliquer par un effet de chasse d'eau du réseau hydrographique (Ribolzi, 1996). La vague d'eau concentrée provenant de Vitisay chasserait devant elle l'eau diluée d'origine lointaine initialement présente dans le lit du Burate. Par ailleurs, les valeurs élevées de la conductivité suggèrent une contribution non négligeable du sol de la zone de lutites pyriteuses de Vitisay.

Les fortes valeurs de conductivité persistent pendant toute la période des forts débits et le début de la décrue. A partir de 23h00, lorsque l'hydrogramme présente un épaulement, la conductivité décroît rapidement, indiquant ainsi, la contribution d'un nouveau réservoir constitué d'eau moyennement concentrée. Ces valeurs intermédiaires peuvent être dues

- soit à un mélange entre eau concentrée du secteur Vitisay avec de l'eau diluée (pluie ou eau du haut Burate)
- soit à un réservoir de moyenne altitude.

Cette question sera tranchée à partir de l'observation des autres paramètres.

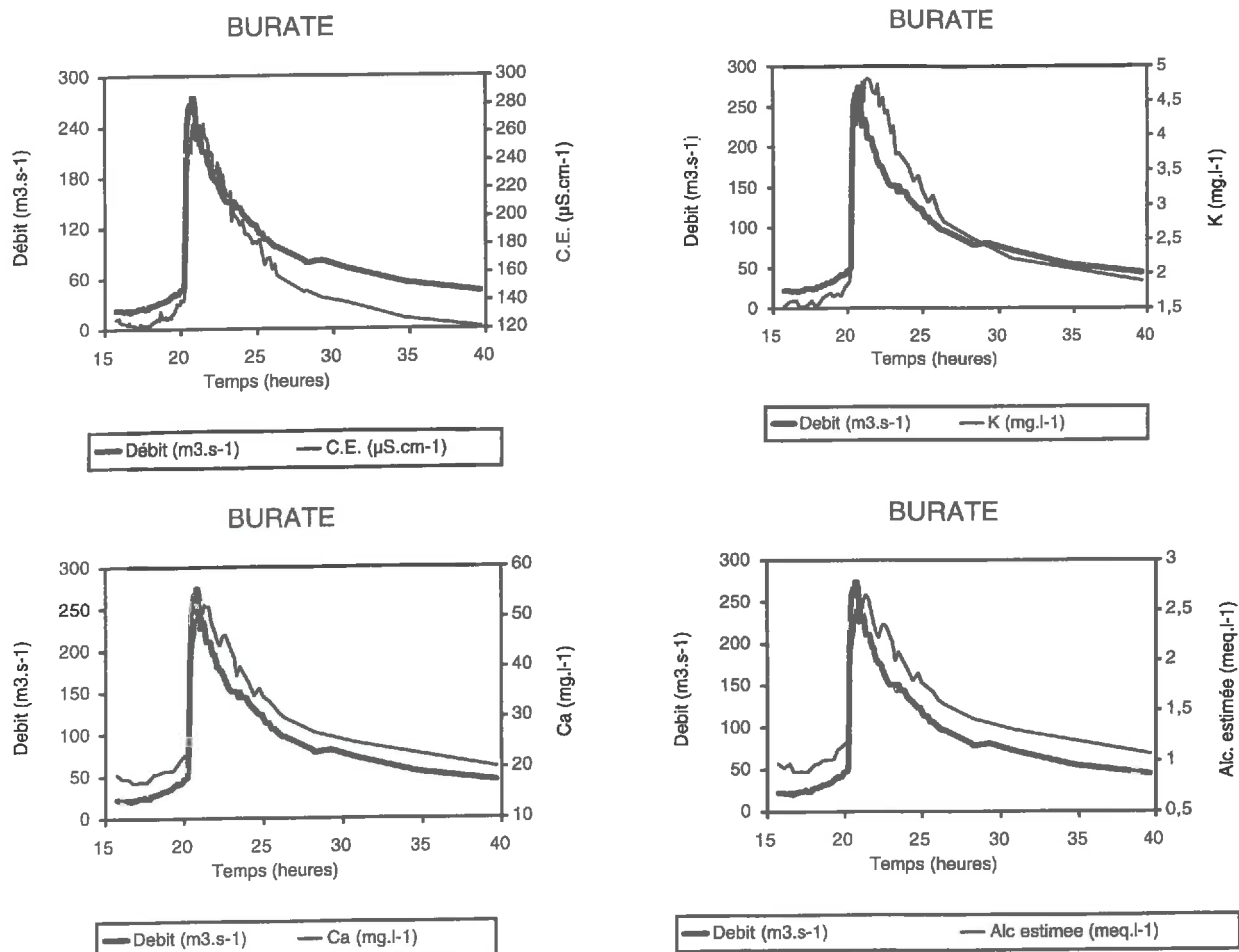


Figure VI.2: Evolution temporelle du premier groupe de paramètres lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.

En fin de décrue, la conductivité évolue progressivement vers les valeurs initiales. La fin du tarissement, constitué d'eau diluée, est alimenté par le secteur du haut Burate, le plus éloigné du point de mesure.

Le fait que la conductivité électrique en fin de décrue revienne exactement aux valeurs initiales, soient $120 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ constitue un autre point remarquable du chimiogramme.

Les variations de teneur en calcium et en potassium et de l'alcalinité sont tout à fait comparables à celles de la conductivité électrique. Les mécanismes mis en évidence par cette dernière sont analogues pour ces deux paramètres. La seule différence notable est la largeur du pic plus importante pour ces paramètres que pour la conductivité électrique. Cet aspect sera discuté dans le prochain paragraphe. Cependant ces informations sont probablement qualitatives pour le calcium et l'alcalinité car l'équilibre avec la calcite est atteint (annexe I). Ces paramètres doivent être considérées comme marqueurs plutôt que traceurs.

Essai de décomposition à deux pôles avec la conductivité électrique rivière Burate:

La représentativité de la conductivité électrique par rapport aux autres paramètres physico-chimiques a été largement discutée dans le paragraphe précédentes. L'utilisation de ce paramètre en temps que traceur est justifiée par son hétérogénéité spatiale et temporelle dans l'ensemble du Burate.

La décomposition géographique à deux pôles a été réalisée avec ce traceur (Fig. VI.3). Elle oppose les eaux du secteur Vitisay aux eaux des zones cristallines de Tomón et du

haut Burate. Les résultats indiquent l'essentiel des mécanismes déduits des variations temporelles des paramètres dissous et particulaires. Ces interprétations sont donc confirmées.

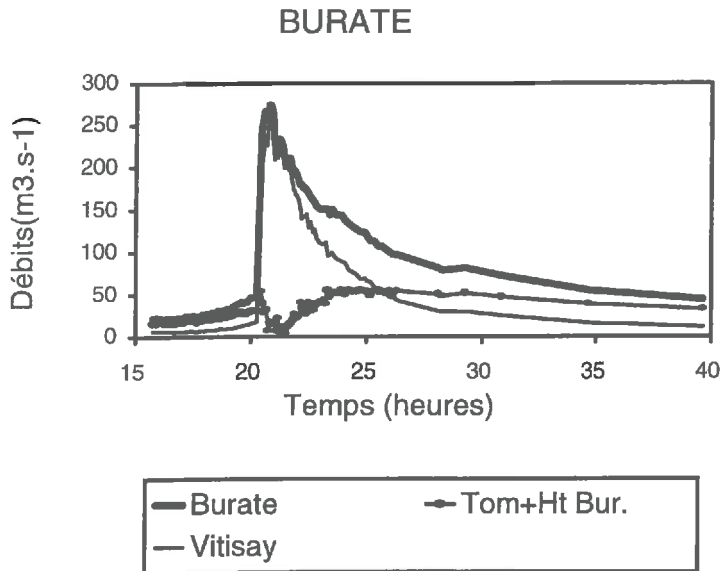


Figure VI.3: Essai de décomposition par deux pôles géographique en utilisant la conductivité électrique mors de la crue du 9-10 juillet 1995. Les deux pôles choisis sont le secteur Vitisay et les zones cristallines (constituées du bassin Tomón et du haut Burate).

Le petit pic d'eau provenant du secteur amont qui apparaît au début de la vague permet de quantifier l'effet de chasse d'eau.

La vague du secteur Vitisay est plus précoce que l'eau qui vient du secteur amont. Elle survient brusquement et décroît tout aussi vite, ce qui montre un caractère dispersif peu marqué. En revanche, pour la décrue, une forte proportion du secteur amont du bassin assure le débit du milieu et de la fin de la décrue. En effet, au début de décrue, à partir de 23h30, la proportion Vitisay est encore importante, mais quand survient le deuxième épaulement, cette proportion change au profit de la quebrada Tomón et du haut Burate. Cette contribution de Tomón et du haut Burate est très étalée, ce qui traduit un effet important d'atténuation ou dispersif.

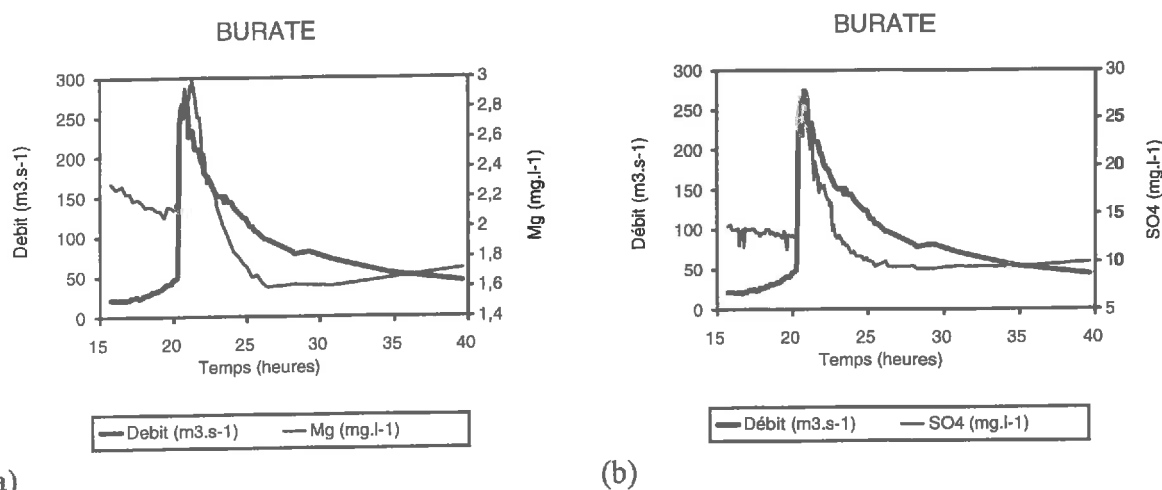
Ces interprétations coïncident avec celles données dans les paragraphes précédents.

Le groupe magnésium et sulfate

Comme pour le torrent Jarillos et Corojó ce couple de paramètres est fortement corrélé dans le río Burate (Annexe I). L'étude spatiale des propriétés chimiques des eaux et la simulation des processus d'oxydation de la pyrite ont montré que ces paramètres marquent spécifiquement la zone de lutites pyriteuses. Pour le magnésium, les concentrations ne sont pas très importantes mais, en revanche, les variations temporelles sont suffisantes pour observer différents cheminements de ce paramètre au long de la crue.

La montée progressive de débit est particulièrement différente à celle observée pour le premier groupe des paramètres (Fig. VI.4). Dans cette étape, le sulfate présente une concentration initiale faible. Il est fort probable que pendant cette phase d'alimentation de base le réservoir impliqué soit le haut Burate, car dans cette partie du bassin les eaux sont plutôt alcalines. Lors de la vague d'eau les teneurs de sulfate sont maximales. Le décalage entre le maximum de la concentration et le débit de pointe est encore plus marqué que pour la conductivité électrique. Ceci confirme l'effet de chasse d'eau préexistante dans le réseau hydrographique par une eau plus sulfatée et magnésienne du secteur Vitisay que constitue l'essentiel de la vague. Dans cette phase, le synchronisme observé entre l'onde hydrique et

l'arrivée des éléments dissous est analogue pour le sulfate. En revanche, l'étalement du pic de concentration est moins marqué, le pic est étroit, ce qui indique une origine plus restreinte au niveau spatial. Il montre la brièveté de la contribution du secteur lutitique riche en sulfate de Vitisay. La pointe de la concentration dure jusqu'au premier épaulement de la décrue, ce qui suggère l'existence de deux réservoirs géographiques riches en sulfate, celui de la pointe de débit étant plus concentré que celui s'exprimant lors de l'épaulement. A partir de ce moment, vers 23h00, les teneurs diminuent assez rapidement et lorsque la deuxième phase de la décrue apparaît la concentration atteint les niveaux les plus bas de la crue. Au même moment la conductivité présente des valeurs moyennes. La faible teneur en sulfate qui atteint des valeurs inférieures à l'état initial, ne peut pas s'expliquer par un mélange entre l'eau sulfatée du secteur Vitisay et l'eau diluée peu sulfate du secteur amont présente au point de mesure avant la crue. Il s'agit d'un nouveau réservoir caractérisé par des conductivités moyennes et une faible teneur en sulfate. Il s'agit du secteur Tomón. Ce qui élimine la première hypothèse avancée lors de l'étude des variations de la conductivité dans le groupe précédent. Enfin dans l'étape de tarissement les teneurs commencent à remonter pour y atteindre l'état initial de l'épisode.



(a) (b)
Figure VI.4: Variations temporelles des teneurs en magnésium(a) et en sulfate (b) lors de la crue du Burate.

Les variations des teneurs en magnésium sont comparables à celles du sulfate (fig. VI.4. b). Mais certains aspects décrits précédemment sont plus marqués. Dans la montée progressive des eaux, le magnésium présente une concentration initiale moyennement forte, mais subit une diminution progressive. Autrement dit, le réservoir initial est plus riche en magnésium et une dilution par des écoulements moins concentrés en cet élément provoque une légère décroissance. Ce qui suit montre que ceci peut s'expliquer par une augmentation des débits provenant du secteur Tomón par rapport à ceux du haut Burate d'origine plus lointaine. Ainsi, l'hypothèse sur les écoulements de base d'origine amont, suggérée jusqu'à présent peut être affinée en termes de différenciation des contributions grâce au magnésium.

La vague d'eau, en revanche véhicule des eaux à fortes concentration en magnésium originaires du secteur Vitisay, car ce cation est libéré par des processus d'oxydation de matériau lutitique abondamment présent dans ce secteur. Le décalage entre le maximum de concentration en magnésium et le débit de pointe, confirme encore l'effet de chasse d'eau observé pour les autres paramètres.

A la suite de la vague d'eau, la concentration en magnésium diminue très rapidement comme pour le sulfate, mais elles atteignent les valeurs minimales sur l'ensemble de la crue. L'existence de ce minimum au milieu de la décrue constitue un point original par rapport aux autres paramètres. Comme la décroissance observée lors de la montée progressive de débit, ceci ne peut s'expliquer que par une modification du rapport entre les débits provenant de

Tomón et de haut Burate. En effet, l'étude des caractéristiques chimiques du bassin versant (Chapitre II), montre l'existence d'une zone de haute montagne, drainée par les torrents Escurufini et Escundrun, qui coulent sur des affleurement volcanoclastiques donnant des eaux moyennement concentrées en magnésium. Ces écoulements à teneurs moyennes en magnésium subissent une dilution par les eaux provenant du secteur Tomón riches en roches cristallines de type gneiss ou pegmatites et qui présentent de faibles teneurs en magnésium. Ainsi, le minimum de teneur en magnésium montrent la contribution maximale du sous bassin Tomón. Le tarissement est alimenté par des écoulements du haut Burate plus riches en magnésium que ceux provenant de la quebrada Tomón ce qui provoque une légère augmentation de concentration qui évolue vers l'état initial.

Le groupe sodium, chlorure, température et oxygène-18

Ces paramètres présentent une allure assez comparable (Fig. VI.5); leurs variations sont opposées à celles des deux groupes précédents. L'interprétation portera tout d'abord sur le chlorure et le sodium, puis sur la température et l'oxygène-18. Les concentrations obtenues pour le sodium sont plus importantes que pour le chlorure mais les variations de ces deux paramètres sont tout à fait comparables.

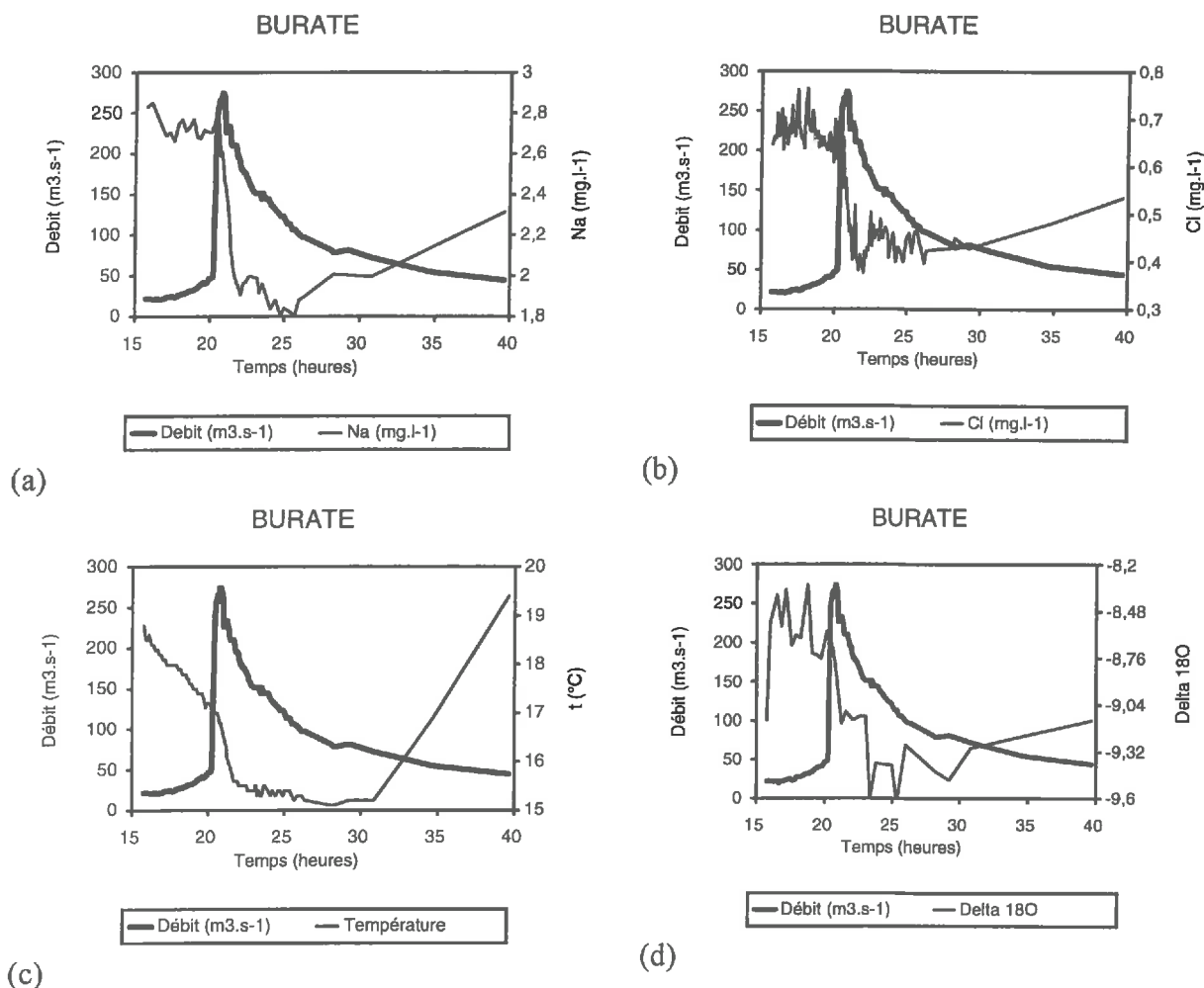


Figure VI.5: Evolution du chlorure (a), sodium (b), température (c) et oxygène-18 (d) lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.

Les concentrations obtenues pour le sodium sont plus importantes que pour le chlorure mais les variations de ces deux paramètres sont tout à fait comparables. Les caractéristiques initiales, lors de la montée progressive des eaux, sont marquées par les valeurs

les plus concentrées de l'épisode. La signature dans cette première phase ressemble à celle des eaux de haute montagne constituées d'eau de pluie légèrement concentrée. En effet, une concentration par évapotranspiration; peut occasionner, dans le cas de Burate, une légère concentration du chlorure et du sodium. Les fortes teneurs en sodium peuvent avoir une autre origine; à l'origine atmosphérique s'ajoute l'altération de minéraux sodiques, comme les feldspaths sodiques ou calco-sodiques sont présents dans les granites, pegmatites et autres roches cristallines abondantes dans la partie amont du bassin. Ainsi, le débit de base est essentiellement alimenté par le haut Burate.

Lors de l'arrivée de la vague d'eau, les teneurs en sodium et chlorure ne changent pas, ce qui confirme que le front de cette vague est constituée d'eau préexistante dans le Burate qui est mobilisée par la vague. A l'arrière, pour le débit de pointe et le début de la décrue, les teneurs en sodium et chlorure diminuent montrant l'arrivée d'eau de pluie. Cependant, il existe encore dans ce mélange, une forte proportion d'eau préexistante. Dans la seconde phase de la décrue, les teneurs en chlorure sont celles de l'eau de pluie qui constituent alors l'essentiel des écoulements. Avec l'apparition de l'eau provenant de Tomón, une faible proportion d'eau enrichie, très probablement par évaporation, en chlorure et sodium apparaît. En effet, ce sous bassin est un des moins arrosés de l'ensemble Burate. Enfin lors du tarissement, les teneurs de ces deux paramètres évoluent vers les valeurs initiales attribuables à la contribution du haut Burate.

Pour interpréter les variations en ^{18}O , nous disposons des valeurs moyennes de la pluie entre le 3 et le 19 juillet 1995, ainsi que de l'eau s'écoulant des sous bassins étagés en altitude pour la période précédant la crue. En fonction de l'altitude, le $\delta^{18}\text{O}$ de la pluie varie de -5,49‰ (Boconó) à -8,92 ‰ (Las Mesitas) et les sous bassins de -7,22 ‰ (Tomón) à -8,32 ‰ (Haut Burate). Manifestement, l'épisode pluvieux qui a provoqué la crue, se caractérise par des valeurs plus négatives que la moyenne observée sur le début de la saison des pluies.

Au départ de la crue, le signal isotopique montre des valeurs très voisines (-8,3 ‰) de celles qui caractérisent les eaux préexistantes du Haut Burate. Lors de la montée progressive du débit, les teneurs s'enrichissent légèrement, probablement en raison de la faible précipitation des premières averses sur la confluence, plus basse en altitude.

Lors de l'arrivée de la vague d'eau, l'appauvrissement en $\delta^{18}\text{O}$ est très progressif, ce qui confirme l'effet «de chasse d'eau» déjà signalé. Cette évolution se poursuit jusqu'à une petite stabilisation liée à l'arrivée des eaux de Tomón; une évolution similaire peut être observée avec Cl. L'arrivée de l'onde de crue du Haut Burate, déjà repérée avec les autres traceurs, correspond à la valeur minimale caractéristique de la pluie de haute altitude. La décrue se traduit par un enrichissement rapide puis progressif des concentrations. Bien que le nombre de données soit insuffisant pour avoir une certitude, les valeurs ne semblent pas retrouver rapidement les valeurs initiales, ce qui traduirait une recharge conséquente des réserves d'altitude par l'eau de pluie, marquée négativement.

La pression partielle du gaz carbonique (pCO_2), l'Alcalinité Résiduelle Calcite (A.R.C.) et le pH

Les différentes teneurs en CO_2 de l'eau sont en rapport avec la lithologie et l'origine profonde et superficielle. L'utilisation de la pCO_2 comme marqueur met en évidence des mécanismes de météorisation de roches ainsi que l'origine des écoulements. L'étude spatiale et la modélisation de l'altération de roches cristallines ainsi que l'oxydation de la pyrite en présence de CO_2 (Chapitre IV) ont montré qu'il existe deux principaux comportements pour le CO_2 . Tout d'abord, les faibles valeurs de pCO_2 , sont associés à l'altération des roches cristallines qui consomment du CO_2 pour produire de l'alcalinité carbonatée. Ensuite les plus fortes valeurs pCO_2 peuvent être attribuées aux eaux provenant de matériaux riches en carbone organique et dont l'oxydation dans un milieu saturé en eau produit des fortes teneurs en CO_2 . L'évolution entre ces pôles lors de la crue va être influencé par les différentes contributions

géographiques présents dans l'ensemble du Burate. Cependant, pour les eaux fortement chargées en CO_2 , l'écoulement turbulent peut provoquer une perte de gaz vers l'atmosphère. Ainsi, la pCO_2 est un marqueur, il donne des indications qualitatives mais ne peut être utilisé comme traceur car son comportement n'est pas conservatif.

Pour la crue étudiée, la pCO_2 varie selon quatre étapes (Fig. IV.6). La montée progressive de débit est constituée d'eaux pauvres en CO_2 ($\log(\text{pCO}_2)=-3,7$), ce qui traduit des contributions issues de l'altération de zones cristallines dans lesquelles la consommation du CO_2 est importante. Il s'agit du haut Burate.

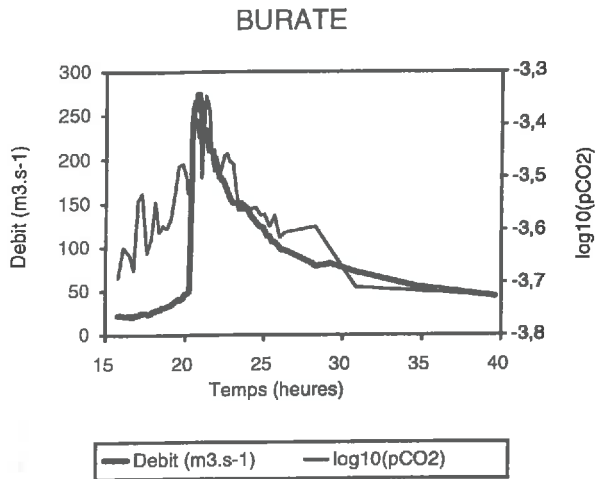


Figure VI.6: Evolution de la pCO_2 estimée lors de la crue du Burate les 9-10 juillet 1995. Les valeurs sont issues des calculs avec AQUA, à partir des mesures de terrain (pH) et de laboratoire (composition chimique).

Avec la brusque augmentation des débits, la pCO_2 atteint des valeurs plus élevées ($\log(\text{pCO}_2)=-3,3$) que l'équilibre avec l'atmosphère ($\log(\text{pCO}_2)=-3,5$). Le débit de pointe concerne donc des solutions de sol provenant de zones lutitiques proches de l'exutoire du Burate et ayant perdu une partie de leur CO_2 par brassage lors d'un écoulement turbulent. Durant le premier épaulement de la décrue, il est possible d'observer une légère diminution ($\log(\text{pCO}_2)=-3,5$), qui doit concerner une deuxième arrivée du secteur lutitique. Le deuxième épaulement de la décrue, attribuable à la quebrada Tomón possède les caractéristiques des eaux d'altération des roches cristallines. Le tarissement conduit à une évolution progressive vers l'état initial.

Avec la pCO_2 comme marqueur, il a été possible de différencier l'origine profonde et superficielle des eaux. La différenciation entre écoulements superficiels (érosion superficielle attribuée aux zones lointaines) et écoulements profonds (érosion incisive attribué aux zones proches à l'exutoire) a été réalisé.

D'après, le calcul thermodynamique, les eaux, atteignent l'équilibre avec la calcite (annexe I), et il convient donc d'utiliser l'A.R.C. comme traceur plutôt que le calcium et l'alcalinité carbonatée qui n'ont pas forcément un comportement conservatif du fait de l'équilibre avec la calcite. Contrairement au torrent Corojó où l'utilisation de l'ARC n'a pas été possible à cause des faibles concentrations, pour le Burate les concentrations observées sont suffisantes et significatives pour tenter une interprétation des variations temporelles.

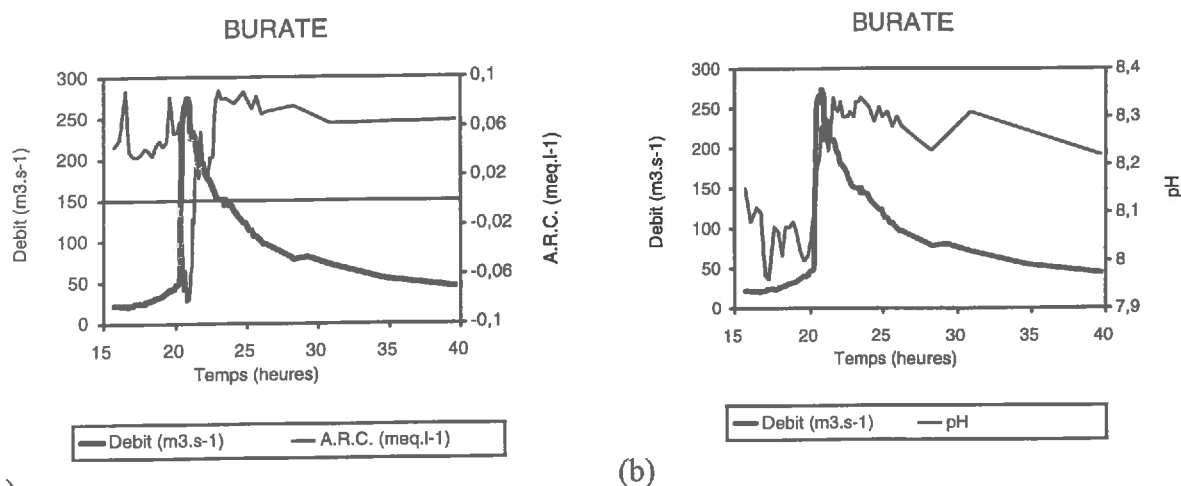
Lors de la montée progressive du débit, l'A.R.C. est positive (Fig. VI.7). Ceci indique des flux alcalins surtout lors des premières heures. Ensuite, l'A.R.C. diminue de $0,09 \text{ meq.l}^{-1}$ à $0,05 \text{ meq.l}^{-1}$ pour ensuite se diriger vers les teneurs initiales. Malgré cette décroissance le régime de base reste alcalin, ce qui confirme les indications des autres paramètres. Lorsque la vague d'eau arrive, l'A.R.C. descend de manière brutale, en individualisant une contribution de courte durée. Les valeurs deviennent alors négatives ($-0,09 \text{ meq.l}^{-1}$). Ces eaux ont une composante acide responsable d'une A.R.C. négative qui indique ici l'arrivée des eaux acides du secteur Vitisay. Il faut remarquer que la durée de cette diminution est brève et coïncide avec le débit de pointe et le tout début de la décrue. Un autre niveau d'ARC apparaît alors

dans la décrue avec des niveaux intermédiaires. Ceci indique l'arrivée d'une seconde contribution de même origine géographique, à savoir le secteur Vitisay, mais se distinguant par un niveau d'acidité différent. Ainsi, la première contribution proche de l'exutoire, notée par la suite Vitisay 1 est caractérisée par des eaux à composante acide. Elle est suivie de Vitisay 2 un peu plus éloignée et plus riche en carbonate de calcium.

Ensuite, la décrue se poursuit avec des valeurs d'A.R.C croissante aux alentours de $0,06 \text{ meq.l}^{-1}$ qui peuvent être considérées comme un mélange entre Vitisay 2 et Tomón dont les eaux sont alcalines.

Enfin, lors de la troisième étape de la décrue, l'A.R.C. atteint les valeurs maximales positives ce qui indique l'arrivée d'un réservoir alcalin et lointain. Ces teneurs restent assez stables et lorsque la phase de tarissement s'installe, celles-ci diminuent légèrement pour atteindre les teneurs de l'état initial.

L'A.R.C. confirme les mécanismes préalablement suggérés par les autres paramètres et permet même de détailler deux origines dans la composante provenant du secteur Vitisay.



(a) (b) Figure VI.7: Variations temporelles de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (a) et du pH (b) pour la crue du Burate des 9-10 juillet 1995.

6.1.3. Le suivi et la caractérisation de matières en suspension (M.E.S.)

Le taux de M.E.S. est fortement corrélé au débit (fig. VI.8). L'augmentation lente des débits qui précède la forte crue s'accompagne d'une légère montée du taux de M.E.S. L'arrivée de la vague à 20h30 induit une forte augmentation du taux de M.E.S. qui atteint alors 30 kg.m^{-3} . Il existe cependant un effet de retard du taux de M.E.S. par rapport aux débits; ce retard entre les transferts de M.E.S. et d'eau est encore plus marqué lorsque se considère les flux de MES. (fig. VI.8). Comme pour les autres paramètres, ceci doit être attribué à un effet de chasse d'eau

Les valeurs maximales de flux de M.E.S. sont considérables puisqu'elles dépassent 8 tonnes/seconde. La masse de sédiment transportée entre 20h30 et 23h00, c'est à dire pendant le débit de pointe et le début de décrue, constitue l'essentiel du transport de la crue. C'est à ce moment là, que l'effet de chasse d'eau, qui avait été observé aussi dans l'étude des éléments dissous, apparaît. Il doit être lié à l'arrivée de l'onde à forte vitesse et qui pousse devant elle les matériaux dissous et solides.

La courbe des quantités cumulées de M.E.S. (d'après la méthode préconisée par Laraque et Olivry, 1996) présente une pente constante depuis la montée brutale des débits jusqu'à la deuxième rupture de pente de l'hydrogramme sur la décrue. Il semblerait donc que le Burate soit dès 20h30 en phase typique d'érosion et transport pour ensuite aborder une phase de transport et sédimentation à partir de 24h00. Depuis le début des mesures jusqu'à 20h30, la

quantité de sédiments transportés est tout à fait insignifiante et correspond essentiellement à la phase de mise en suspension des sédiments déposés lors de la précédente décrue. Cet aspect sera traité dans les paragraphes concernant la granulométrie.

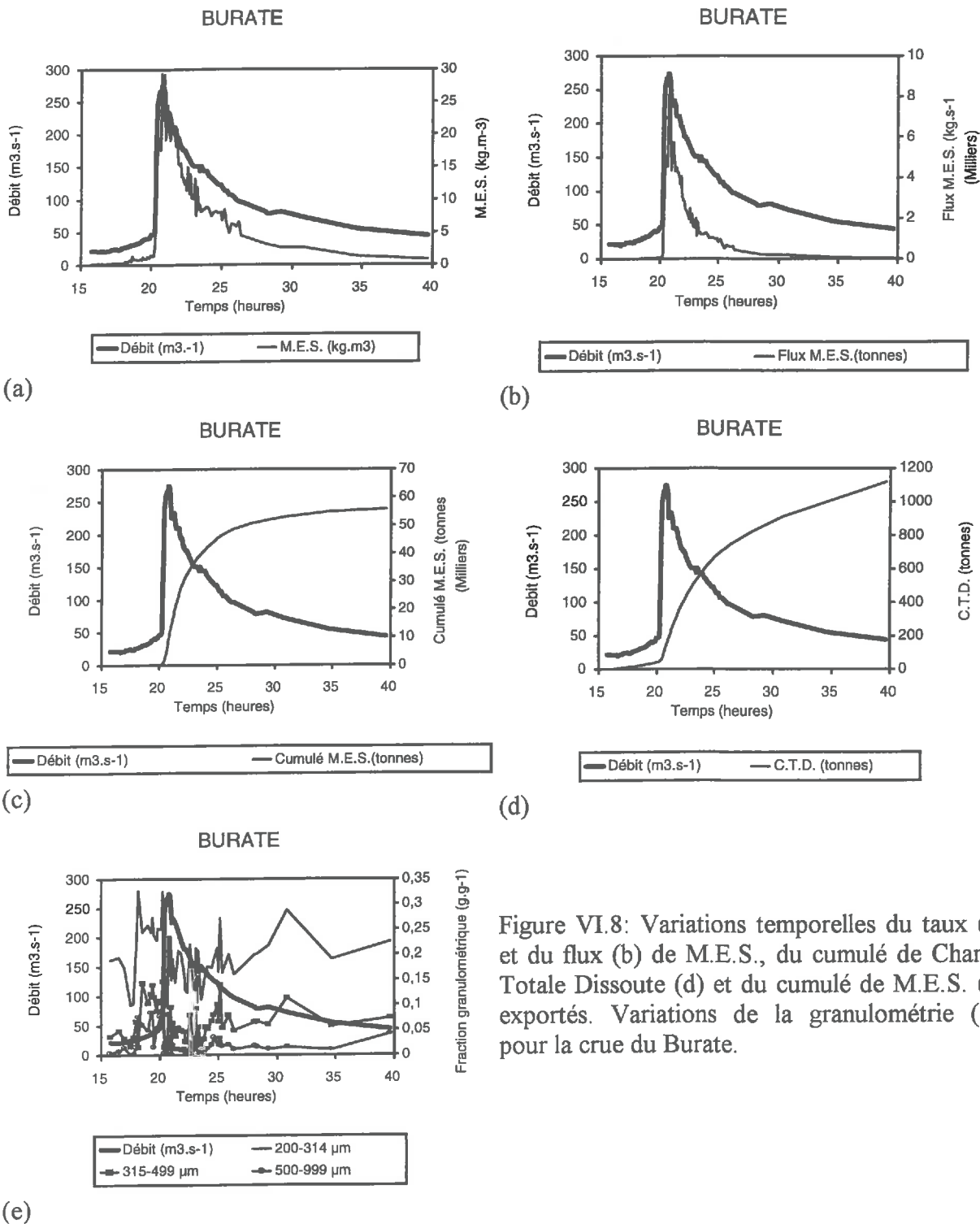


Figure VI.8: Variations temporelles du taux (a) et du flux (b) de M.E.S., du cumulé de Charge Totale Dissoute (d) et du cumulé de M.E.S. (c) exportés. Variations de la granulométrie (e), pour la crue du Burate.

La quantité totale de sédiments exportés est de $56 \cdot 10^3$ tonnes, dont la moitié passe entre 20h30 et 21h55, c'est à dire lors des deux contributions du secteur Vitisay. En fin de décrue, le taux de M.E.S. est non négligeable, si bien que si l'on intègre les 10 heures suivantes, la quantité de M.E.S. exportée passe de $56 \cdot 10^3$ à $65 \cdot 10^3$ tonnes soient respectivement $153,8 \text{ t.km}^{-2}$ et $178,6 \text{ t.km}^{-2}$.

Le premier chiffre doit être comparé à 3,08 t.km² d'exportation d'éléments dissous, ce qui montre que l'exportation sous forme dissoute représente moins de 2 % des exportations totales. Aussi, ces teneurs montrent l'importance des processus d'érosion hydrique aussi accélérés surpassant largement la vitesse des processus de pédogenèse.

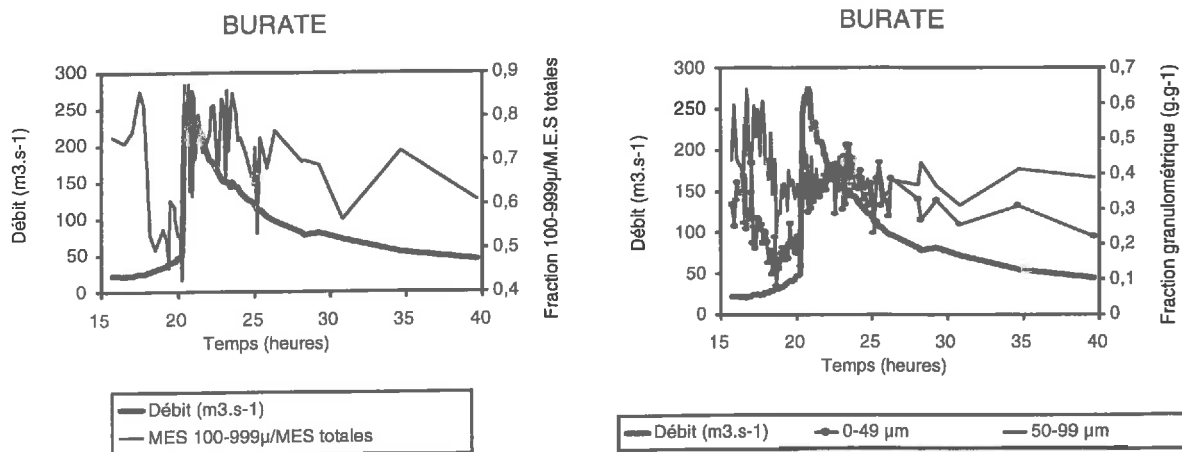
Evolution de la granulométrie

La granulométrie des sédiments varie elle-même durant les différentes phases de l'épisode. Lors de la montée progressive des débits, avant 20h30, l'augmentation modeste du taux de M.E.S. est essentiellement liée à la mobilisation de particules grossières (Fig. VI.8 e et VI.9) probablement originaire du lit de la rivière. Le diamètre des sables peut alors atteindre 1 mm.

Lors de l'arrivée de la crue et durant la période des plus forts débits, les matériaux sont fins et se caractérisent par une égalité pondérale entre les fractions 0-50 µm et 50-100 µm (Fig. VI.9). Ces résultats ressemblent fortement à ceux obtenus sur le torrent Jarillos, affluent du Burate,. Ils confirmeraient l'hypothèse d'une origine proche, depuis les zones de lutites pyriteuses, de l'eau présente lors du débit de pointe. Il convient de préciser que les sédiments présentent de fortes variations de couleur lors de la crue, mais la couleur noire typique des schistes pyriteux marque les sédiments du río Burate et plus particulièrement lors du débit de pointe, ce qui confirmerait les conclusions précédentes.

Il est difficile d'expliquer les variations granulométriques observées seulement par la mise en suspension des matériaux du lit du torrent, car l'arrivée des débits de pointe s'accompagne d'un accroissement du taux de particules fines, de diamètre inférieur à 50 µm. Leur taux passe en effet de 20 à 40 %. Il semble plus réaliste de relier ces variations de granulométrie à l'origine géographique des matériaux.

A partir de 23h00, puis plus nettement lors du tarissement, les fractions granulométriques 0-50 µm et 50-100 µm évoluent progressivement vers des valeurs proches de celles observées avant la crue. Cette phase est caractérisée par l'augmentation de la fraction grossière.



(a) (b)
Figure VI.9: Evolution des fractions grossières (a) et fines (b) des M.E.S. lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.

Evolution des composés organiques des M.E.S.: carbone organique particulaire (C.O.P.) dans la fraction de 0-200 μm

Pour cette crue un suivi en carbone organique particulaire (C.O.P.) a été réalisé (fig. VI.10) sur la fraction 0-200 μm . Les paramètres concernant le carbone sont le taux de C.O.P. en mg C.g^{-1} de sédiments fin, le rapport C/N et le signal isotopique $\delta^{13}\text{C}$.

Les évolutions temporelles montrent qu'à la montée progressive de débit, les taux de C.O.P. sont considérables, elles atteignent jusqu'à 20 mg C.g^{-1} de sédiments fins. Le rapport C/N alors significatif et élevé montre qu'il s'agit de matière organique peu décomposée, constituée d'un mélange de litière et d'horizon humique. La signature isotopique indique une origine forestière de ces composés.

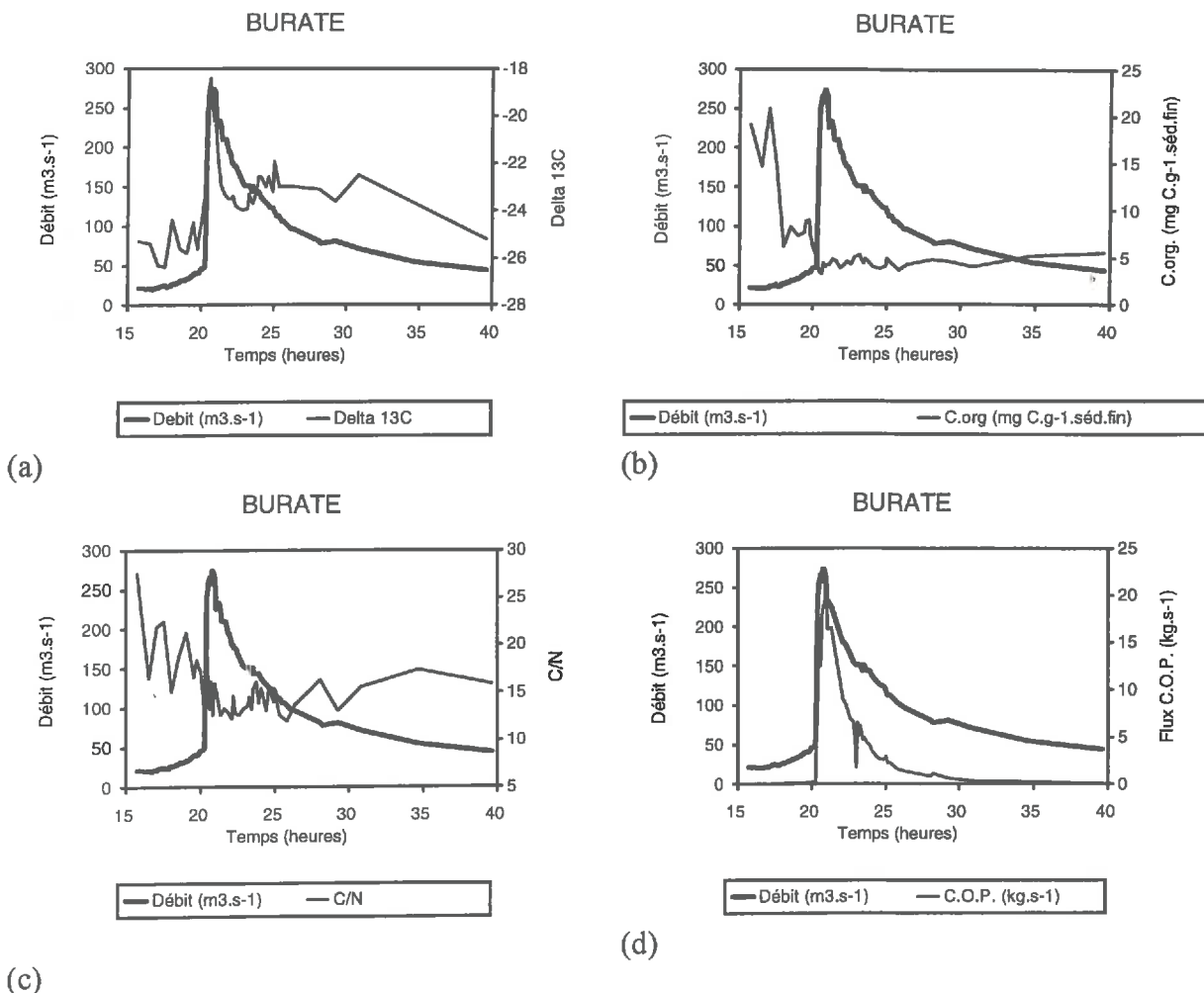


Figure VI.10 : Evolution temporelle des différents paramètres du Carbone Organique Particulaire (C.O.P.), lors de la crue du 09 au 10 juillet 1996. (a) variations du $\delta^{13}\text{C}$; (b) variations du taux de C.O.P.; (c) variations du rapport C/N et (d) flux du C.O.P. lors de la crue.

Avec l'arrivée des forts débits, le taux de C.O.P. chute brutalement traduisant une contribution de matériaux plus profonds, et l'apparition d'une érosion incisive. Le C/N diminue jusqu'à des valeurs proche de 12 qui sont caractéristiques des horizons humiques. La contribution des litières semble avoir disparue. Le $\delta^{13}\text{C}$ change fortement il atteint -18 ce qui montre que le C.O.P. provient essentiellement des champs cultivés en maïs, végétation en C4. Cette contribution est très brève; elle ne dure que la phase de montée de crue jusqu'au premier épaulement de la décrue. Les flux de carbone sont maximum, ils atteignent 22 kg.s^{-1} . Il faut

remarquer dans cette courbe de flux que l'effet de chasse d'eau est aussi observé comme pour l'ensemble de paramètres étudiés pour cette crue.

Pendant la décrue et jusqu'au tarissement les taux de C.O.P. sont faibles et stables traduisant des contributions des horizons profonds et une érosion incisive. Ceci est confirmé par l'égalité de la fraction granulométrique 0-49 μm et 50-99 μm . A partir du premier épaulement de la décrue, la signature isotopique de -25‰ confirme l'arrivée d'un troisième pôle concernant les lutites charbonneuses du secteur Vitisay. Lorsque le deuxième épaulement de la décrue apparaît, le $\delta^{13}\text{C}$ remonte et indique une nouvelle arrivée de matière organique provenant de champs de maïs, même si cette seconde contribution de zones cultivées est plus modeste que la première. Il faut l'attribuer à l'aval du bassin de la quebrada Tomón qui est en partie cultivé. A partir de cette étape de la crue, le flux de C.O.P est faible. Le rapport C/N et le $\delta^{13}\text{C}$ évoluent vers les valeurs initiales montrant l'arrivée de matière organique moins décomposée de plantes C3, d'origine forestiers ou du páramo (pelouse d'altitude).

Les évolutions temporelles de ces paramètres montrent l'origine géographique du carbone organique présente lors de la crue. Des variations importantes du taux de C.O.P. et leur marquage isotopique $\delta^{13}\text{C}$ ont permis distinguer les origines de la matière organique. L'essentiel des flux de C.O.P. proviennent des horizons humiques de champs de maïs et des matériaux géologiques lutitiques, en proportion sensiblement égale. Les autres pôles géographiques ne contribuent que de façon négligeable aux flux de C.O.P.

6.1.4. Synthèse sur la crue du río Burate

Au premier abord, la crue du Burate semble facile à interpréter grâce au traçage chimique et isotopique. Cependant, le nombre de mécanismes suggérés par cette technique est assez élevé.

Le régime de base est soutenu par des eaux diluées et alcalines qui proviennent des zones hautes d'altération des roches cristallines sous température basse. Elles véhiculent des matériaux organiques issues de litières forestières. Lors de l'averse, une légère augmentation de débit, probablement issues d'un ruissellement au voisinage du point de mesure, ne semble pas affecter les caractéristiques physico-chimiques. Lors de l'arrivée des eaux provenant des zones lutitiques, l'augmentation des débit est spectaculaire. Cette onde pousse devant elle l'eau initialement présente dans le réseau hydrographique. La conductivité électrique et le taux de M.E.S. sont maximum sur l'arrière de cette vague. Les M.E.S. sont alors moins riches en C.O.P. dont l'origine est attribuable aux horizons organiques des champs cultivés en maïs, puis dans un second temps caractéristiques de la roche mère lutitique. La décrue est interrompue par l'arrivée de l'onde provenant du secteur Tomon, moyennement concentrées et transportant un C.O.P. mixte comprenant une certaine proportion d'horizons humiques de champs cultivés en maïs. Enfin, l'arrivée tardive de l'onde provenant du haut Burate, caractérisée par ses eaux diluées, constitue l'ultime contribution géographique.

L'utilisation des différentes méthodes pour le traçage chimique et isotopique des eaux et de M.E.S s'avère très intéressante dans ce milieu torrentiel à fortes vitesses. Il a été possible d'identifier l'origine des eaux, des éléments dissous et particuliers à partir des informations véhiculées par ces paramètres, ainsi que les temps de transferts des écoulements. Les contrastes lithologiques et altitudinaux présents dans le bassin du Burate constituent un avantage pour l'utilisation du traçage. Les traceurs utilisés sont très divers et appartiennent aux différentes phases; c'est le cas de la pCO_2 pour la phase gazeuse, l'isotope du carbone pour la chimie des M.E.S. et la conductivité électrique pour les éléments dissous.

Les flux de M.E.S. pour cette cru moyenne atteignent les 8 tonnes/seconde, pour un taux de M.E.S. de 30 kg/m^3 , ce qui lui confirme le caractère torrentiel très marqué de cette rivière. Cependant, ces valeurs ne représentent que des moyennes sur un bassin versant de 375 km^2 très hétérogène et compte tenu des connaissances sur les contributions de chaque secteur

il convient de détailler les bilan des exportations (Tableau VI.1). La forte pluviométrie du secteur Vitisay unis à une lithologie meuble sur de fortes pentes provoque de forts processus d'érosion hydrique. Les exportations en éléments dissous et particuliers dans ce secteur sont les plus importants du bassin. Ils atteignent un facteur 5 pour les M.E.S. ainsi que un facteur de 3,4 pour les éléments dissous par rapport à la moyenne du bassin. Les autres sous bassins qui forment le versant nord du Burate sont moins arrosés et par voie de conséquence leurs exportations sont faibles bien que non négligeables.

L'exportation de matières dissoutes ne représente seulement que 2% du bilan total l'exportation de cette crue. Les 98% restants concernent la phase solide. L'essentiel de cette exportation est attribuée au secteur Vitisay, car c'est pendant la contribution de ce réservoir géographique que s'écoulent plus du 50% de M.E.S ainsi que de matières dissoutes.

La décomposition en pôles géographique a été appuyée sur la définition des pôles en terme de chimie des éléments dissous (conductivité électrique) issue de l'étude spatiale réalisée dans le chapitre IV. Elle permet d'estimer les contributions spécifiques de chaque unité fonctionnelle au flux d'eau, d'éléments dissous et de M.E.S.. Il apparaît ainsi que les valeurs mesurées sur le Burate sont la moyenne de sous-bassins aux comportement très contrastés.

Tableau VI.1:
Récapitulatif des quantités d'eau, d'éléments dissous et particuliers exportées par le Burate. Valeurs estimées grâce à la décomposition de l'hydrogramme.

Sous bassin Burate	Lame écoulée (mm)	Exportation ME.S. (t.km ²)	Exportation C.T.D. (t.km ²)
Secteur Vitisay (Vitisay1, Vitisay2)	66,00	883,00	10,59
Tomón	12,32	88,14	2,64
Haut Burate	13,40	73,18	1,78
Moyenne du río Burate	18,90	178,6	3,08

6.2 Les crues du Río Boconó du 15 et 16 juillet 1994

La branche Boconó, avant sa confluence avec le Río Burate, est la seule ayant fait l'objet d'études avant ce travail. Elles ont été réalisées par l'équipe l'Université des Andes et en particulier par Velásquez (1990, 1994, 1995 communication personnelle) et portent sur diverses périodes; elles concernent la quasi totalité de ce sous-bassin et ont été réalisées avec un pas de temps très lâche. Les informations fournies par ces chercheurs ont été particulièrement utiles pour la qualification des débits et par conséquence pour le calcul des divers flux. Il ont permis de juger de la représentativité des crues étudiées dans ce travail grâce aux chroniques qu'ils ont enregistrées.

Dans le présent travail, deux séries de mesures et de prélèvements ont été réalisés sur la branche Boconó. La première, effectuée dans la ville de Boconó les 15 et 16 juillet 1994, a concerné deux épisodes pluvieux. La seconde a eu lieu à la confluence avec le Río Burate les 9 et 10 juillet 1995. Il s'agit de deux crues d'importance comparable; aussi, contrairement aux autres cours d'eau pour lesquels seule une crue a pu être étudiée, le Boconó a été échantillonné à deux reprises; il sera donc possible d'apprécier la stabilité des mécanismes de transferts d'une année sur l'autre. Les deux sites sont distants de 2 km. Sur ce trajet, le Boconó recueille les eaux de quelques torrents provenant du Guaramacal (Quebradas Chandá et Segovia uniquement) et qui ressemblent fortement à la quebrada Corojó. Leur lithologie est marquée par la présence de lutites pyriteuses.

Aussi, dans l'ensemble, les temps de réaction et le comportement hydrologique doivent être comparables entre les deux points de mesure. Par contre, la seule observation des

sédiments permet de distinguer les deux séries de part leur couleur. Les sédiments prélevés à Boconó en 1994 sont orangés alors que ceux prélevés en 1995 avant la confluence avec le Burate sont grisâtres. Cette différence remarquable traduit la forte contribution des deux affluents Chandá et Segovia en terme de sédiments.

Les deux séries de mesures et d'observations vont être étudiées successivement. Ce sous chapitre traitera des crues de 1994, qui ont été essentiellement utilisées pour la mise au point méthodologique des prélèvements de crues. Ainsi, le but recherché a été plus une étude de la représentativité des prélèvements localisés par rapport à la section et la détermination des pas de temps optimaux (Chapitre III) qu'une étude des mécanismes de transferts. C'est pour cela que les paramètres physico-chimiques mesurés sont moins nombreux que pour les autres séries. La température, le pH et donc la pCO_2 , les isotopes stables de l'eau n'ont pas été dosés ou mesurés. Cependant, pour tous les éléments dosés, les informations recueillies ont paru suffisamment intéressantes pour étudier les mécanismes de transfert et figurent donc dans ce chapitre.

Le site de mesure des crues du 15 et 16 juillet 1994 correspond au pont de la rivière Boconó. Les ouvrages bétonnés ont permis de réaliser une échelle limnigraphique. Les mesures et les prélèvements réalisés concernent deux épisodes pluvieux. Le premier survint en fin de nuit le 15 juillet au matin et le second s'est produit le lendemain. Ils furent constitués de nombreuses petites averses qui perdurèrent plusieurs heures et assez hétérogènes spatialement, notamment pour le premier. Par ailleurs, le sous bassin Burate fut plus arrosé que celui du Boconó lors de ces deux jours, ce qui confirme le caractère atypique de ces épisodes pluvieux.

6.2.1 Etude de l'hydrogramme

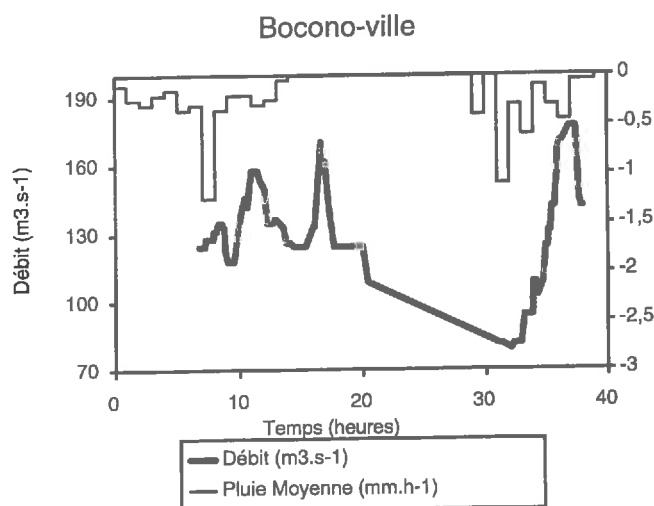


Figure VI.11: Hydrogramme et pluviogramme du 15 et 16 juillet 1994. La pluviométrie est une moyenne entre les stations météorologiques Páramo Cristalina et Boconó-aeropuerto. Cette moyenne cache de fortes disparités.

L'hydrogramme et le hétérogramme correspondants à ces deux épisodes pluvieux révèlent une certaine complexité (Fig. VI.11). Le premier épisode pluvieux a engendré une crue d'allure multiple avec trois maxima relativement bien marqués compris entre 140 et 170 $m^3 \cdot s^{-1}$. Le second épisode a induit une crue dont seule la première partie, à savoir la montée de crue et le début de décrue, ont pu être observés. Le débit de pointe est de 180 $m^3 \cdot s^{-1}$. Ces valeurs placent ces crues un peu en dessous de la médiane avec une fréquence de retour de l'ordre de l'année et montrent que malgré la structure peu homogène des pluies tant au niveau spatial que temporel, les crues engendrées sont assez représentatives.

Le volume total d'eau écoulé pendant la période de mesures (du 15 à 16 juillet 1994) est de 13,26 millions de m³ dont 6,57 millions de m³ pour la première crue. Ceci correspond respectivement à 29,6 mm et 14,7 mm de lame d'eau écoulée sur les 448 km² du sous-bassin.

6.2.2 Variation des teneurs en éléments dissous.

Comme pour les crues étudiées dans le chapitre précédent, une étude statistique a été réalisée sur les analyses chimiques afin de simplifier le traitement des données (annexe I). Le premier plan de l'A.C.P. qui représente 85% de la variance montre trois groupes d'éléments ou paramètres chimiques. Le plus important est celui constitué par la conductivité électrique, le calcium, le magnésium, l'alcalinité carbonatée. Le sulfate et le phosphate ont un comportement voisin de ce groupe, le potassium constituant une transition entre ces deux premiers groupes. En revanche, le chlorure présente un comportement plus singulier, comme le sodium qui est intermédiaire entre le chlorure et le premier groupe. Toutefois ces écarts de comportements sont moins marqués que pour la crue du Burate. Les coefficients de corrélation entre ces trois groupes d'éléments sont relativement élevés. Contrairement aux autres crues, il n'a pas été possible de mesurer le pH et la température *in situ*, ce qui élimine toute possibilité de calcul de la pCO₂.

Ainsi, seront abordés successivement la conductivité électrique, le sulfate, le chlorure et le sodium.

Le groupe de la conductivité électrique, du calcium, magnésium et de l'alcalinité carbonatée

Pendant le régime de base, entre les deux crues, la conductivité électrique présente les valeurs minimales mesurées pour cette série (Fig. VI.12). Ces valeurs voisines de 60-70 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sont caractéristiques des eaux d'altération des roches cristallines à basse température. Ainsi, le régime de base serait alimenté par les zones de haute montagne et de haute vallée du Rio Boconó.

Avec l'arrivée de la seconde crue, la conductivité augmente immédiatement avec l'augmentation des débits. Ainsi, les premières eaux arrivant sur le point de mesure semblent provenir des zones sédimentaires lutitiques ou des secteurs de roches pyroclastiques localisés au voisinage de la ville de Boconó. Les valeurs maximales de la conductivité électrique sont nettement plus faibles que pour le Burate ou pour les torrents du Guaramacal, ce qui indique que la contribution du versant sud de ce massif à l'amont de la ville de Boconó ne contribue que de façon modérée à cette montée de crue; les eaux diluées d'altitude sont encore en proportion suffisante pour limiter la conductivité électrique.

A partir du milieu de la montée de crue, lors du débit de pointe et du début de la décrue, la conductivité électrique diminue assez régulièrement. Il semble donc que les eaux du débit de pointe et de la décrue soient issues des zones de moyenne et de haute montagne, probablement du sous-bassin San Miguel et surtout de la vallée du Río Negro.

Pour la première crue, les variations sont qualitativement comparables à celles décrites pour la seconde crue. Ainsi, après une augmentation de la conductivité lors du second maximum, la conductivité électrique diminue lors du dernier maximum et de la décrue.

Ainsi, le comportement de ce groupe d'éléments est comparable à celui observé dans le cas du Burate. Un régime de base alimenté par les zones hautes produisent les concentrations les plus basses, la montée de crue constituée d'eaux provenant des secteurs sédimentaires conduit à une augmentation de concentrations. Les eaux arrivant plus tardivement à l'exutoire sont diluées et issues des zones hautes, produisant une diminution des concentrations. La différence majeure entre les crues du Boconó et celle du Burate réside dans les proportions d'eau provenant des différents secteurs. Pour le Boconó, les zones d'amont sont les plus arrosées; aussi, le débit de pointe est-il constitué des eaux diluées issues de ce secteur. La décroissance de la concentration précède le débit de pointe. Pour le Burate, c'est l'opposé; les zones basses proches de la confluence sont les plus arrosées; le débit de pointe

provoqué par ces zones contributives conduisent à une synchronisation des maxima de conductivité et de débit.

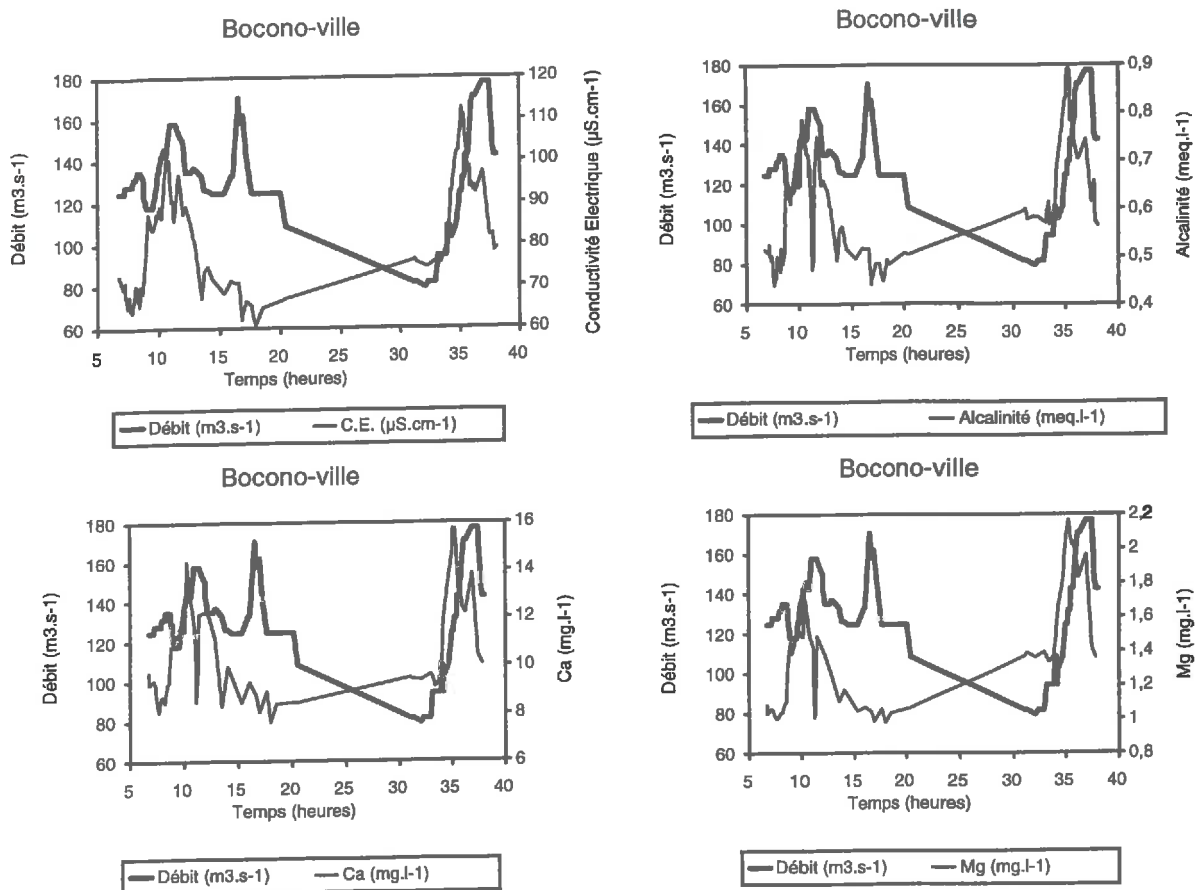


Figure VI.12: Evolution temporelle du premier groupe de paramètres physico-chimiques
 Les variations des autres paramètres chimiques de ce groupe fournissent des indications similaires à celles qui viennent d'être décrites pour la conductivité électrique.

Le sulfate et le phosphate

Ce groupe d'éléments présente des variations très proches de celles décrites dans le paragraphe précédent (Fig. VI.13). Les teneurs sont basses pour le régime de base, puis augmentent lors de la première partie de la montée de crue. La diminution des concentrations en fin de montée de crue et lors du débit de pointe est moins marquée que pour la conductivité électrique ce qui constitue la différence majeure avec le premier groupe de paramètres.

La signification de cette différence n'est pas immédiate.

Le chlorure et le sodium

Avant le début de la deuxième crue, les teneurs en chlorure sont maximales et oscillent autour de cette valeur durant la phase de montée des débits et du pic de crue.

Pour la première crue (Fig. VI.14), les teneurs en chlorure sont du même ordre de grandeur que celles observées pour la seconde. Cependant en fin de crue, elles chutent de manière significative, pour remonter lors du régime de base avant la seconde crue. Il semblerait donc que les débuts de crue soient constitués d'eau légèrement concentrée et donc probablement préexistante à l'épisode pluvieux, alors que la pluie plus diluée contribuerait essentiellement à la décrue.

Ce comportement de Cl et Na est voisin de celui observé dans le cas du Burate. La différence avec le Burate est le caractère très tardif de la diminution des concentrations en fin

de crue. Cette différence provient du fait que pour le bassin de Boconó les zones d'amont, cristallines et froides sont aussi les plus arrosées; l'absence de sécheresse ne produit pas de concentration de chlorure contrairement aux zones basses moins arrosées et donc plus sèches.

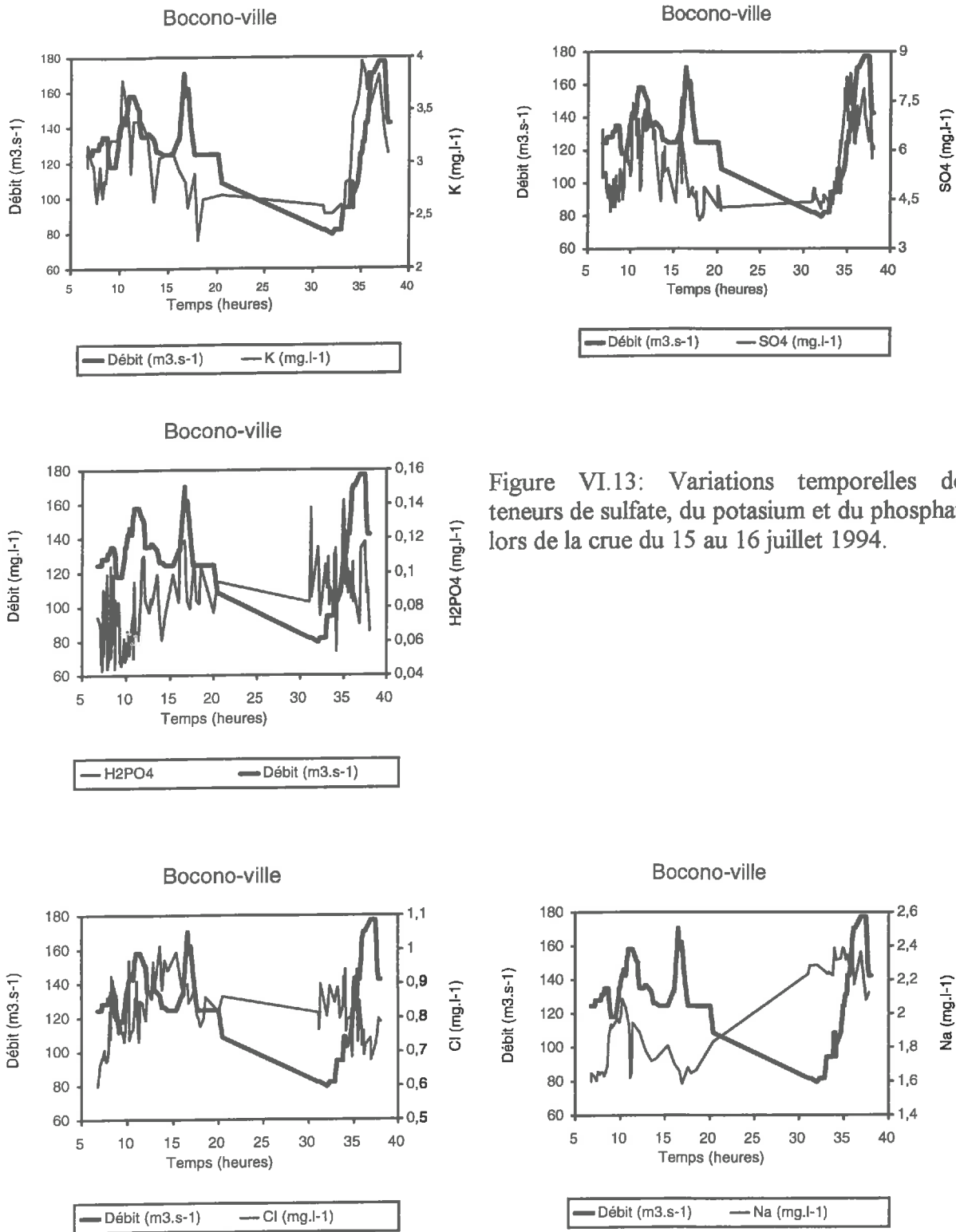


Figure VI.13: Variations temporelles des teneurs de sulfate, du potassium et du phosphate lors de la crue du 15 au 16 juillet 1994.

Figure VI.14: Variations temporelles des teneurs en chlorure et en sodium lors de la crue du 15 au 16 juillet 1994. Chaque valeur est la moyenne entre deux prélèvements simultanés.

Le cas du Burate est opposé; les zones sèches sont situées à l'amont du bassin dans le secteur des roches cristallines et des eaux diluées. Ainsi, pour le Burate les comportements du groupe chlorure/sodium sont très différent de celui de la conductivité alors que cette différence de comportement s'estompe dans le cas du bassin de Boconó.

L'alcalinité résiduelle calcite

Le pH n'ayant pu être mesuré sur place, l'estimation de la pCO_2 n'est pas possible pour cette crue. En revanche, l'A.R.C. qui s'est avérée utile pour l'étude des torrents et du Burate mérite d'être étudiée.

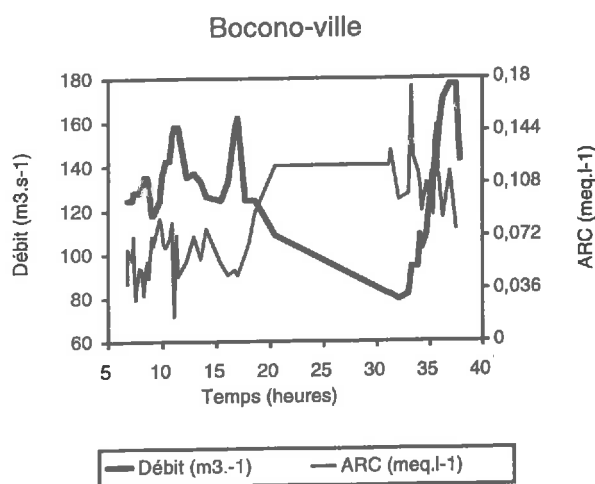


Figure VI.15: Variations temporelles de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (A.R.C.) pour les crues du 15-16 juillet 1994 à la ville de Boconó.

L'alcalinité a été dosée par titrimétrie sur tous les échantillons et comparée à l'estimation par la neutralité électrique comme pour les autres séries; les deux méthodes ont donné les mêmes résultats. Cependant, pour cette crue, l'A.R.C. peut être considérée comme encore plus précise que pour les autres séries.

Les résultats (Fig. VI.15) montrent que contrairement aux résultats obtenus sur les torrents Corojo et Jarillos ou bien sur le Burate, l'A.R.C. est toujours positive; ceci confirme la faible contribution des zones lutitiques responsables de ses valeurs négatives, à l'alimentation de ce bassin en amont de la ville de Boconó. Les valeurs maximales ont été obtenues en période d'étiage, ce qui confirme que durant cette phase, l'eau provient des zones d'altération des roches cristallines ou peu métamorphisées situées dans le haut Boconó, dans la vallée du Río Negro.

6.2.3 Le suivi et la caractérisation des M.E.S.

La particularité des résultats concernant ces crues réside dans les analyses minéralogiques réalisées par diffractométrie des rayons X. Ces mesures ont été effectuées sur la totalité des sédiments de chaque prélèvement, c'est à dire sur toutes les classes granulométriques confondues, ce qui a quelque peu atténué les variations. En revanche, la granulométrie n'a pas été réalisée sur ces sédiments de même que le taux et la chimie isotopique de la matière organique particulaire. L'interprétation des mécanismes de transferts des M.E.S. et de leur origine sera donc sommaire pour cette crue.

Le total des M.E.S. transportées est de 59 793 tonnes (Fig. VI.16) pour les deux crues dont 30 401 tonne pour la première crue. Pour la Charge Totale Dissoute, les valeurs respectives sont 795 tonnes pour les deux crues dont 381 pour la première. Pour les 448 km² de surface du sous bassin, l'érosion spécifique pour chaque crue (Tableau VI.2) est de l'ordre de 65 t.km⁻² pour les M.E.S. et 0,9 t.km⁻² pour la charge totale dissoute. Comme pour le Burate, l'essentiel des exportations d'éléments chimiques sortent du sous bassin de Boconó

sous forme solide. Cependant les érosions chimique et physiques spécifiques sont nettement plus faibles que pour le Burate si l'on considère chaque crue.

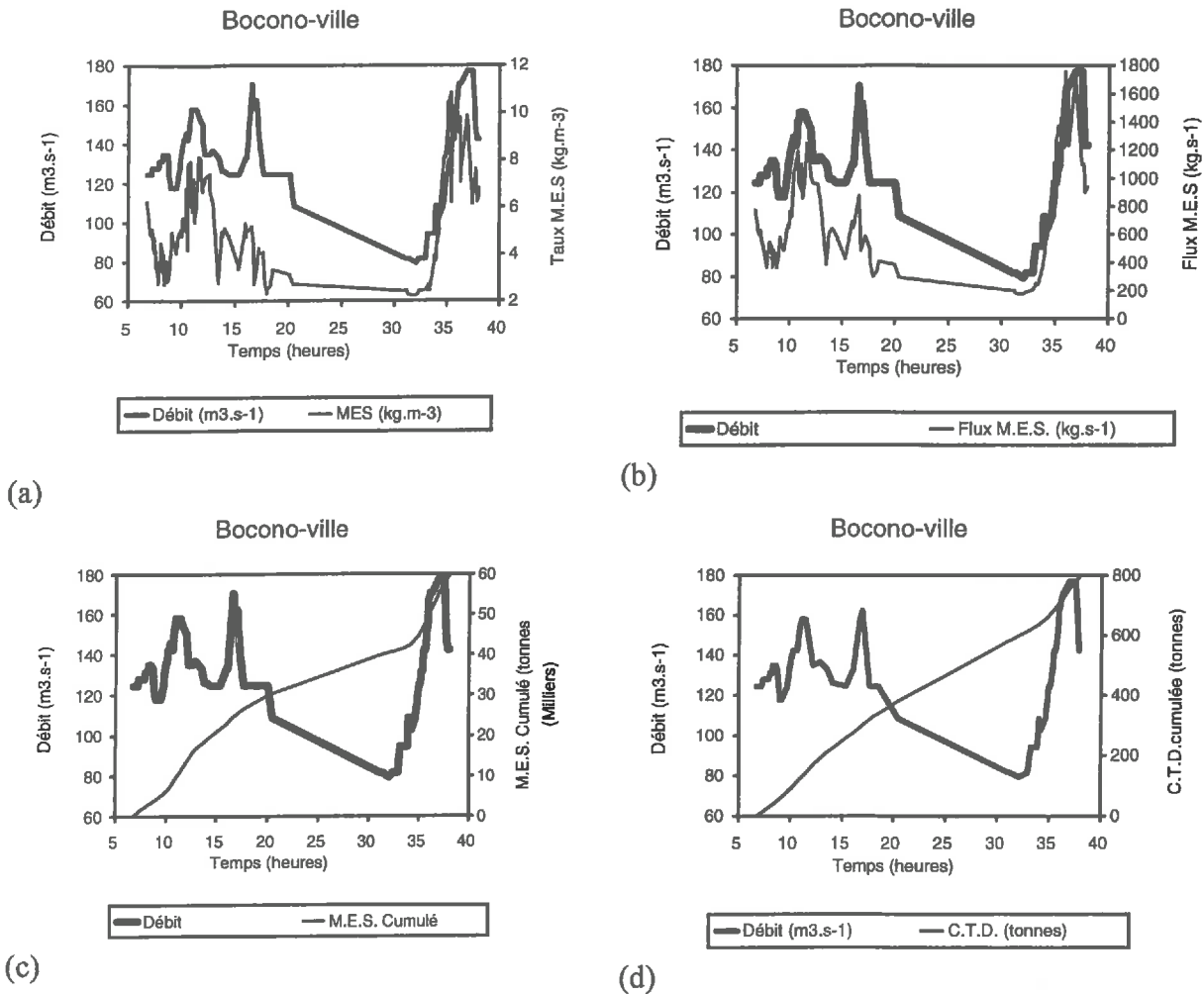


Figure VI.16: Variations temporelles du taux de M.E.S. (a), du flux de M.E.S. (b), des exportations cumulées de M.E.S. (c) et (d) Charge Totale Dissoute (C.T.D.).

Tableau VI.2:

Comparaison des exportations en eau, charge dissoute et M.E.S. pour les deux épisodes de crue du 15-16 juillet 1994 sur le sous bassin de Boconó.

Sous bassin	Année	Lame écoulee mm	Exportation M.E.S. t.km ⁻²	Exportation C.T.D.* t.km ⁻²
Boconó	1994 (1 ^{ère} crue)	14,7	67,9	0,85
Boconó	1994 (2 ^{ème} crue)	14,9	65,6	0,92

*Charge Totale Dissoute.

Le taux de M.E.S. atteint 10-11 kg.m⁻³ ce qui est assez élevé, mais nettement plus faible que pour la crue du Burate de 1995. Les variations temporelles de ce paramètre ressemblent fortement à celles de la conductivité électrique et surtout à celle du potassium. Les maxima de taux de M.E.S. correspondent au début des phases de montée de crue, c'est à dire pour les contributions attribuées aux secteurs lutitiques proches du point de mesure. En

revanche, lors des pics de crue et des décrues, qui sont alimentés essentiellement par les zones cristallines du haut Boconó, tel que la vallée du Río Negro, ce résultat est comparable aux observations réalisées sur le Burate en 1995.

Minéralogie des M.E.S.

La minéralogie des M.E.S. a été étudiée par une méthode semi-quantitative à partir des diffractogrammes de rayons X réalisés sur toute les M.E.S. sans distinction des classes granulométriques.

Les résultats obtenus ont été traités en terme de rapport entre les intensités de raies caractéristiques des minéraux considérés.

Les M.E.S apparaissent composées essentiellement de quartz, de feldspaths et de micas ainsi que d'argiles à 10 Å (micas et argiles de type illite) et secondairement à 7 Å et des chlorites.

L'abondance constante du quartz a été utilisé comme référence et la plupart des intensités de raies caractéristiques ont été comparées à la raie de seconde ordre du Quartz.

Par rapport à des résultats issus de la littérature (Ribolzi, 1996) les variations observées présentent de fortes pulsations liées à la méthode retenue. Aussi, les informations recueillies à partir de ces mesures (Fig. IV.17) devront-elles être considérées comme indicatives.

Le régime de base est marquée par une certaine richesses de minéraux argileux à 10 Å, essentiellement représentée par des micas, de quartz et dans une moindre proportion de feldspaths.

Avec le début de la seconde crue, la répartition entre les différents minéraux philliteux évolue. La proportion de minéraux à 7 Å, de type kaolinite, et plus tard de chlorite augmente au détriment des micas et des argiles micacées. Or la kaolinite est essentiellement formée à partir de l'altération des zones des schistes, micaschistes et des roches cristallines surtout en climat chaud ou tempéré, c'est à dire, dans le cas du bassin versant, plutôt à basse altitude, où la température est la plus élevée. La proportion de micas, minéraux hérités des roches cristallines, diminue. Cette évolution montre un transport de matériaux minéraux issus des zones basses du bassin. Pour la même phase de la crue les paramètres physico-chimiques indiquaient cette même origine pour l'eau. Cette évolution se stabilise à partir du milieu de la montée de crue, c'est à dire à partir de la diminution du taux de M.E.S.

Les évolutions observées pour la première crue sont qualitativement comparables à celles décrite précédemment. En fin de crue, lorsque les eaux issues de la haute montagne parviennent au point de mesure, la proportion de quartz dans les M.E.S. augmente, comme la celle des micas dans la somme des minéraux philliteux, ce qui indiquerait des M.E.S. provenant de type arènes granitiques. Cette évolution confirmerait l'origine d'altitude des M.E.S. minérales durant cette phase de la crue, à l'instar de l'eau.

Il semblerait donc que pour les différentes phases de la crue, l'origine spatiale de l'eau et des M.E.S. minérales soit identique, ce qui indiquerait des vitesses de transfert comparables. Cependant l'imprécision des méthodes utilisées pour la minéralogie des M.E.S. conduit à considérer ce résultat avec prudence.

Il convient de remarquer que certains minéraux n'apparaissent que pendant des phases très brèves de la crue, comme les amphiboles issues probablement des zones volcanoclastiques et qui parviennent au point de mesure en décrue.

Il semble aussi que le choix de considérer la minéralogie de la totalité des M.E.S. d'un échantillon soit un handicap. Il conviendrait, pour les études ultérieures, de fractionner les M.E.S. selon les différentes classes granulométriques afin d'affiner l'étude des variations minéralogiques.

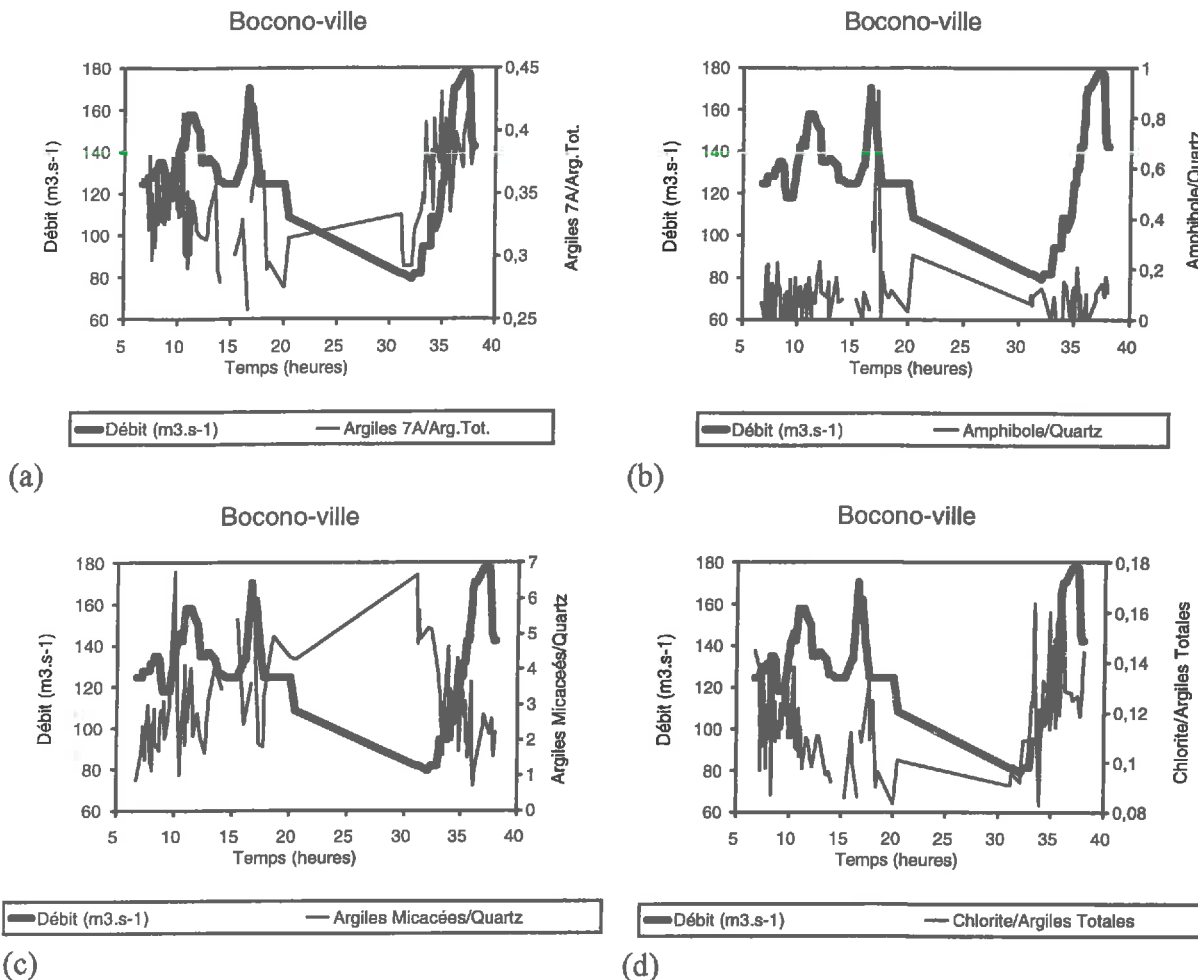


Figure IV.17: Evolution de critères minéralogiques semi-quantitatifs à partir de mesures sur des diffractogrammes de rayons X. (a) relation argiles 7Å/ Argiles Totales, (b) relation Amphibole/Quartz, (c) relation Micas/Quartz, (d) relation chlorite/Argiles Totales.

6.2.4 Synthèse et conclusion sur la crue des 15-16 juillet 1994 du Boconó

L'étude de cette crue, initialement prévue pour une mise au point méthodologique, a toutefois permis de préciser un certain nombre de mécanismes de transferts dans ce bassin ainsi que des ressemblances ou certaines spécificités par rapport aux résultats obtenus sur le Burate en 1995.

Les eaux alimentant le régime de base sont issues de la haute montagne. Les taux de M.E.S., faibles entre les crues mobilisent essentiellement des paillettes de micas et des grains de quartz issus des zones hautes du bassin. L'augmentation des débits est constituée d'eaux issues des zones basses et sédimentaires, nettement plus concentrées et qui transportent des minéraux micacés mais aussi des kaolinites et des chlorites. C'est alors que les taux maximaux de M.E.S. sont observés. Le débit de pointe est constitué d'eaux provenant de l'amont du bassin, plus diluées et moins pourvues en M.E.S. Ces dernières sont essentiellement constituées de quartz, de micas et de feldspaths.

Si les lames d'eau ruisselées pour chacune de ces deux crues sont comparables à celles de la crue étudiée du Burate, les exportations spécifiques tant sous forme solide que dissoute sont nettement inférieures dans le cas du bassin de Boconó.

Les zones contributives pour les débits liquides sont les zones hautes qui sont aussi les plus arrosées. Ceci constitue une différence avec le régime hydrique du Burate.

Les tendances générales des traceurs et des marqueurs observées sur le Burate demeurent valables pour le Boconó, à quelques exceptions près. Ainsi, la conductivité

électrique permet de différencier l'origine géographique. En revanche, le comportement du chlorure et du sodium est différent du fait de la distribution spatiale de la pluviométrie nettement opposée entre le Burate et le Boconó. Ces deux paramètres opposent les zones arrosées aux zones plus sèches, alors que la conductivité électrique et la plupart des éléments dissous opposent les zones sédimentaires aux zones cristallines.

La stabilité des mécanismes de transferts, de la contribution respective des différents sous bassins au débit total de la branche Boconó et de l'ordre d'arrivée de ces différentes zones contributives sera appréciée par la comparaison entre cette crue de 1994 et la crue de 1995 qui va être traitée dans le prochain paragraphe.

6.3 La crue du 9 et 10 juillet 1995 du río Boconó

Cette crue est due au même épisode pluvieux que celui qui a permis l'étude de la quebrada Corojó et du río Burate. Les mesures ont été réalisées juste avant la confluence avec le Burate et la Corojó et de manière synchrones avec les autres points de cette confluence principale. Aussi, il sera possible de comparer les régimes des différents cours d'eau.

Grâce aux relevés de Velásquez *et al*, (1993), nous pouvons considérer cette crue comme une crue moyenne de retour annuel. Elle semble donc représentative des crues habituelles de cette branche du bassin versant en terme de débit.

Le volume écoulé cumulé pour cette crue est de 11,3 millions de m³, ce qui représente 19,7 mm sur les 574 km² du bassin versant. En fait, à la fin des mesures les débits du Boconó sont encore assez importants et ces chiffres sont donc sous-estimés. Malgré cette sous-estimation, le débit spécifique pour cette crue est nettement supérieur à celui du Burate. Cette différence doit être attribuée à la variabilité spatiale de la pluviométrie sur le bassin versant amont du Boconó. En effet, la carte des isohyètes montre que la branche Boconó est nettement plus arrosée que celle du Burate. De même la distribution spatiale de la pluviométrie pour cette semaine, montre une pluviométrie plus importante pour le secteur Boconó que pour celui du Burate (§6.1), conformément aux moyennes annuelles. Les résultats obtenus pour cette crue confirment donc les moyennes annuelles.

6.3.1 Etude de l'hydrogramme

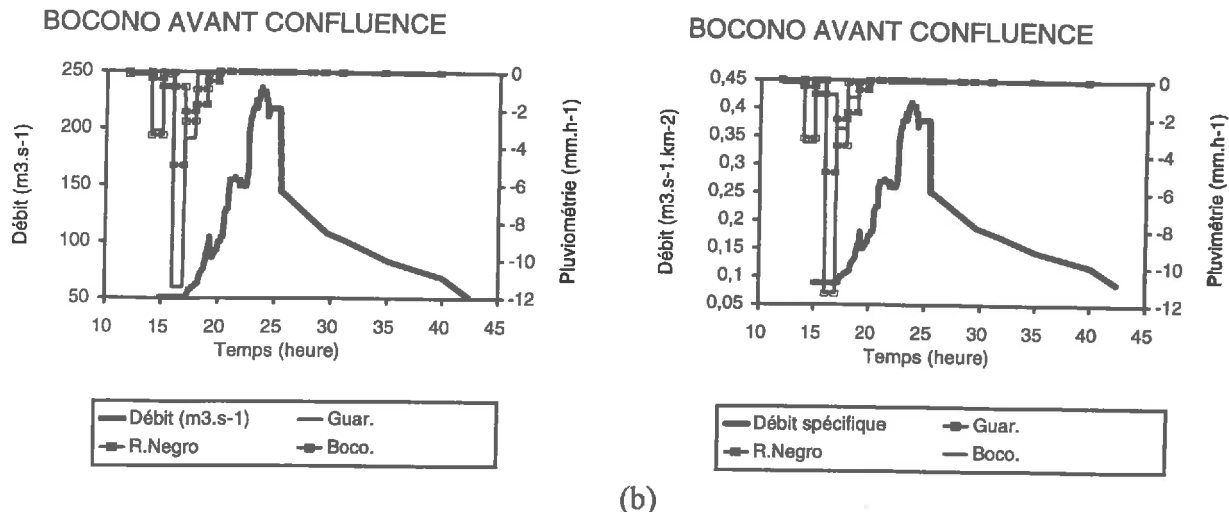
L'hydrogramme de la rivière avant sa confluence (Fig.VI.18) est très différent de celui du Burate, ce qui indique d'emblée un régime hydrologique différent. L'hydrogramme est beaucoup plus étalé que ceux du Burate ou de la quebrada Corojó. Ainsi, le Boconó semble moins torrentiel que ces deux autres rivières. L'étalement est particulièrement perceptible pour la décrue qui dure plus de 15 heures. Le temps de réaction du sous-bassin est aussi nettement plus long que celui du Burate, ce qui confirme le caractère plus torrentiel du río Burate par rapport au Boconó (chapitre II).

L'hydrogramme présente plusieurs étapes. Le début de la crue forme un premier pic aux environs de 18h30. Cette arrivée précoce doit être attribuée aux torrents Chandá, Segovia et San Isidro qui drainent les eaux du Guaramacal et confluent avec le Boconó peu avant, entre la ville de Boconó et la confluence. La quebrada Corojó dont le débit de pointe est atteint vers 18h30 fait partie de ce groupe et illustre le comportement de ces affluents.

Ultérieurement, l'hydrogramme du Boconó présente des maxima relatifs: un à 21h30 et l'autre entre 22h45 et 01h30 qui cerne le débit de pointe à 230 m³.s⁻¹.

Après une phase de décrue rapide, le tarissement s'étale sur 6 heures.

Les stations localisées dans cette branche montrent un synchronisme au niveau spatial; cependant les intensités et les quantités des pluies sont différentes selon le secteur. Les stations Guaramacal et vallée de río Negro les plus arrosées, car c'est dans l'amont de Boconó que convergent les deux masses nuageuses qui apportent la pluie dans le bassin. Ce sont les masses provenant du sud au travers du massif de Guaramacal, et celles qui pénètrent par la partie est.



(a) Figure VI.18: (a) Hydrogramme et hyétogramme de la crue du río Boconó du 9-10 juillet 1995. Stations météorologique: Guar= Guaramacal. R.Negro=valeur moyenne entre río Negro et Campo Elías. Boc.= Moyenne entre Boconó-aéroport et Boconó-MOP. (b) Hydrogramme spécifique.

6.3.2 Evolution des caractéristiques physico-chimiques

La corrélation entre les différents paramètres mesurés a été réalisée par un traitement statistique. Le calcul concerne seulement les anions et cations majeurs. Le premier plan de l'A.C.P. représente de 83,3% de la variance. Les différents paramètres se regroupent selon leur corrélations en trois ensembles principaux. La conductivité électrique, le calcium, le sulfate et l'alcalinité carbonatée constituent le premier groupe. Le sodium et le chlorure composent le deuxième groupe auquel il convient d'ajouter température et $\delta^{18}\text{O}$ qui leur sont fortement corrélés. Le troisième groupe est constitué par le potassium et le nitrate, qui sont par ailleurs fortement corrélés aux M.E.S. Le magnésium occupe une position intermédiaire.

Dans l'étude de cette crue, ce traitement fut enrichi par l'utilisation des autres paramètres. Les paramètres incorporés aux groupes ont été le pH, la pression partielle en gaz carbonique (pCO_2) et l'alcalinité résiduelle calcite (A.R.C.).

Le groupe de la conductivité électrique, du calcium, du sulfate et de l'alcalinité carbonatée

Les paramètres qui composent ce groupe sont fortement corrélés (fig. VI.19). Comme pour le Burate, la conductivité électrique sera choisie comme représentant de ce groupe, par soucis d'homogénéité.

La conductivité électrique présente de fortes variations lors de la crue. Les premières eaux parvenant au point de mesure sont moyennement concentrées ($\text{CE}=100 \mu\text{S.cm}^{-1}$). Cependant, les quelques prélèvements réalisés en tout début de crue montrent des écoulements dilués lors du régime de base proviennent de la haute montagne. Dans la phase de montée de débit, vers 18h30 la conductivité enregistre une augmentation significative. Les eaux présentent les teneurs maximales de la crue. Cette situation persistera jusqu'à l'arrivée du deuxième pic de la phase de montée de débit. La localisation de cette vague d'eau concentrée coïncide avec le débit de pointe de la quebrada Corojó (Chapitre V). Compte tenu de la brièveté de cette onde, typique d'un régime torrentiel, ces écoulements semblent donc provenir du versant sud de massif de Guaramacal, concernant spécifiquement les torrents Segovia, Chandá et San Isidro. Les bassins versants de ces torrents sont constituées de schistes plus ou moins pyriteux bien définis au niveau spatial, et localisés à proximité de la confluence et de la ville de Boconó. Autrement dit, il est fort probable que ces écoulements torrentiels aient une

même origine à savoir le versant du Guaramacal dans sa partie située près de la ville de Boconó et jusqu'à la confluence avec le Burate.

La phase suivante correspond au débit de pointe; lorsqu'il survient, la conductivité électrique diminue rapidement pour atteindre la valeur minimale de la crue. Cette tendance est observée pour tous les autres paramètres de ce groupe. Les eaux qui participent dans cette étape sont très diluées. Leur origine doit être attribuée au secteur amont/centre du bassin de Boconó et concernent la partie cristalline à fortes pentes qui est délimitée entre le torrent El Toro (partie terminale du versant du Guaramacal) et le río Blanco versant nord du bassin. Compte tenu de la distribution spatiale de la pluie, il s'agit du secteur le plus arrosé de cette branche. Les masses nuageuses pénètrent par ce secteur (stations Campo Elías et Valle del río negro), ce qui pourrait induire alors les contributions d'altitude. Avec l'aide des autres paramètres qui seront discutés ultérieurement, cette hypothèse sera vérifiée ou infirmée.

Pendant le tarissement, les valeurs reviennent à ceux de l'état initial (conductivité électrique=100 $\mu\text{S.cm}^{-1}$). Autrement dit, le régime de base et le tarissement sont alimentés par le même réservoir géographique. Ce comportement a déjà été observé pour les autres sous bassins étudiés.

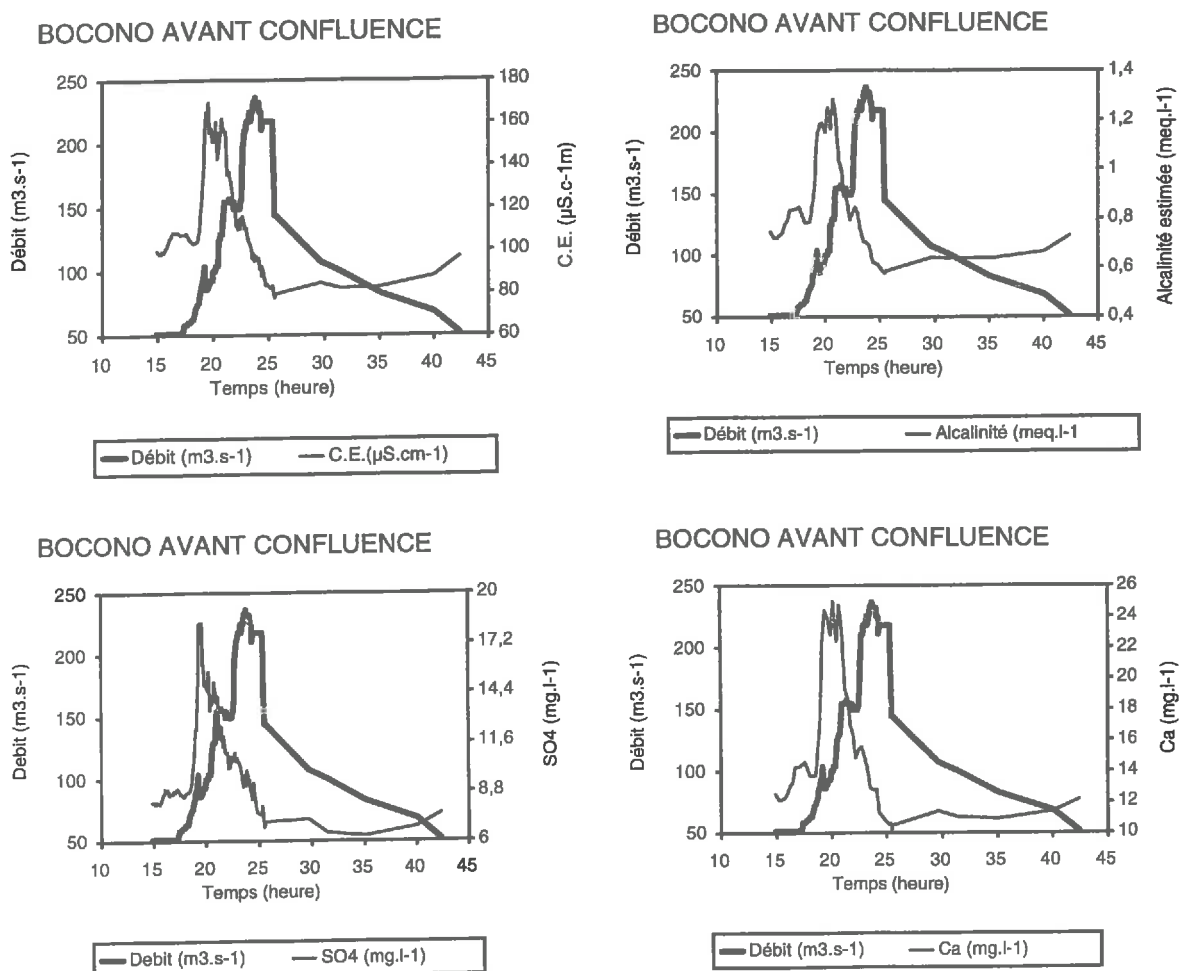


Figure VI.19: Variations temporelles des paramètres du premier groupe, pour la crue du Boconó 9-10 juillet 1995.

Le calcium et le sulfate présentent des variations importantes dans leurs concentrations. Elles se localisent, comme pour la conductivité électrique, au premier pic de la montée de débit. Dans le cas du calcium, des pulsations s'observent qui peuvent être liées aux imprécisions analytiques. Pour le sulfate, en revanche, le maximum de concentration est

instantané et synchrone avec le pic de débit. L'arrivée du second pic de la montée de débits est marquée par une forte dilution des eaux précédentes, la diminution est de 40% des variations observées sur l'ensemble de l'épisode. Les valeurs dans le tarissement pour ces deux paramètres reviennent aussi aux valeurs initiales.

Le groupe du sodium, du chlorure, de la température et de l'oxygène-18 (^{18}O)

Ce groupe est opposé aux paramètres analysés dans les paragraphes antérieurs. Les teneurs obtenues pour le sodium sont plus importantes que pour le chlorure, mais les variations temporelles de ces deux paramètres sont significatives et comparables. Il convient de relier l'origine de ces deux éléments à la pluie.

Les deux vagues qui interviennent dans cette phase de montée progressive de débit sont marquées par les concentrations les plus fortes de l'épisode (fig VI.20). Un comportement semblable a été constaté pour la branche Burate, ce qui veut dire que le mécanisme est analogue. Une légère concentration des eaux initiales par évaporation serait responsable de ce phénomène. Ces contributions sont originaires de la haute montagne.

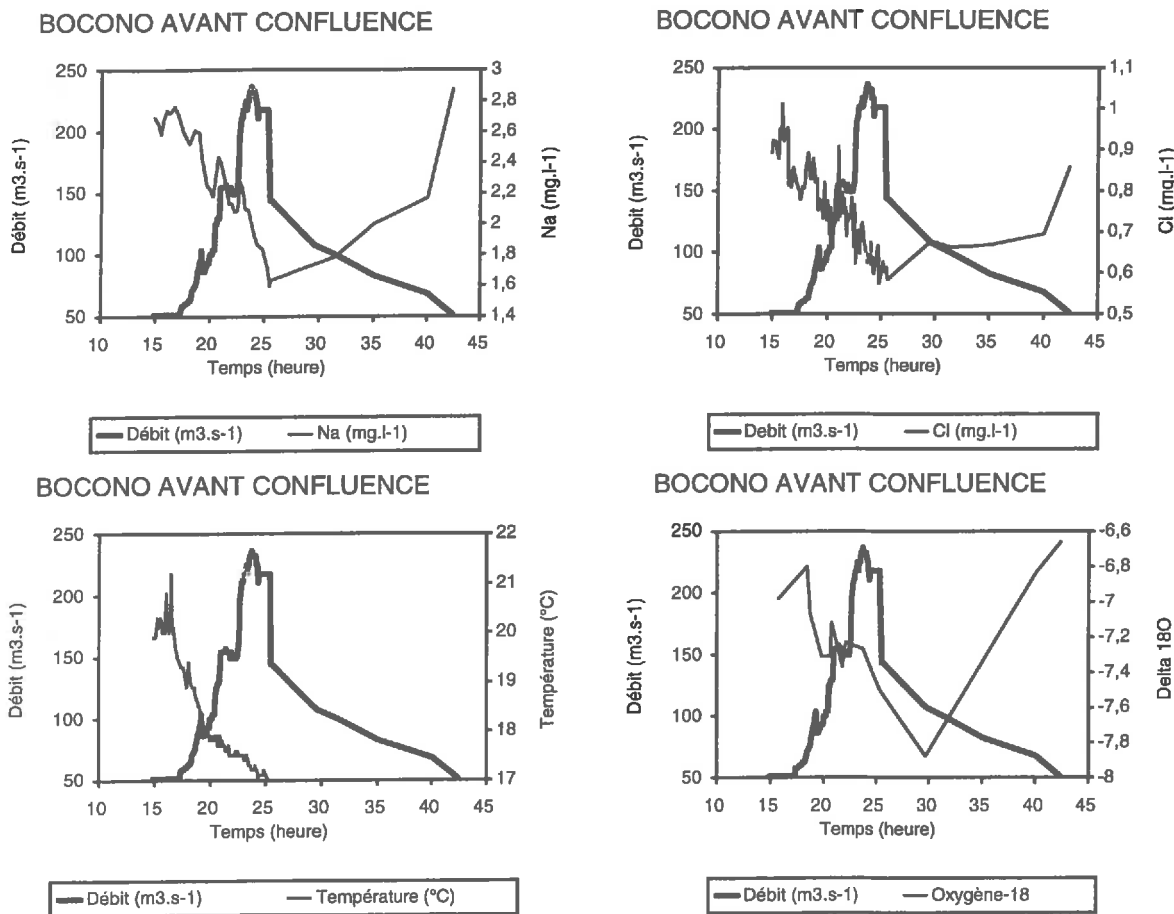


Figure VI.20 : Evolution du sodium, le chlorure, la température et le ^{18}O lors de la crue du Boconó 09-10 juillet 1995.

Pendant la phase du débit de pointe ces deux paramètres diminuent progressivement, ce qui suggère une dilution des eaux précédentes par le réservoir pluie. Une considérable proportion des eaux initiales se prolongent pendant cette phase. C'est lors de l'épaule de la décrue que les proportions vont parvenir aux valeurs de la pluie. Prenant en compte la distribution spatiale de la pluie, il est fort probable que le réservoir d'eau nouvelle (pluie) qui apparaît lors de cette étape soit originaire du secteur torrent Toro-río Blanco car c'est dans

cette zone que les précipitations sont les plus intenses. Le chlorure devient équivalent à ceux de la pluie, mais le sodium maintient un facteur de concentration de 4 par rapport à la pluie.

Le tarissement de la crue montre des eaux comparables à celles du régime de base. Les valeurs de sodium et chlorure reviennent progressivement à l'état initial.

Malgré, l'interruption des mesures de température pendant la crue due à des problèmes d'étanchéité des sondes, ce paramètre mérite d'être commenté. Il apporte des informations qui confirment l'origine des écoulements, surtout en début de crue. Les écoulements du régime de base sont chauds, ce qui suggère un temps de séjour, dans le lit de la rivière, beaucoup plus long. En revanche, lorsque survient le premier pic dans la montée progressive de débit, la température montre une diminution accélérée, montrant donc l'arrivée d'un autre réservoir plus récent et frais, il pourrait s'agir de la pluie.

L'évolution du $\delta^{18}\text{O}$ est plus complexe à interpréter que pour le Burate; en effet, les eaux de pluie ont issues des masses nuageuses d'origine différentes et de ce fait les eaux d'altitude sont paradoxalement plus enrichies. En l'absence de mesure, il n'est pas possible de savoir si les écarts amont/aval relatifs à la pluie du 9-10 juillet 1995 sont les mêmes que ceux observés sur les moyennes pondérées (Chapitre IV).

Les valeurs de départ correspondent bien aux eaux préexistantes du haut bassin (-6,7 ‰ au río Blanco). Les deux vagues qui interviennent lors de la montée de crue entraînent une chute des valeurs et elles correspondent très probablement aux ondes de crue des bassins intermédiaires (Chandá, Segovia,..). Si le léger enrichissement observé au moment du pic principal peut s'interpréter comme l'arrivée de l'onde de crue du haut bassin, en revanche, l'appauvrissement qui accompagne la première phase de décrue est difficile à expliquer. Enfin, la décrue se caractérise par un retour aux valeurs initiales, caractéristiques des eaux préexistantes du haut Boconó.

De manière générale, par rapport au Burate, on observe un écart pour tous ces paramètres. Ainsi, les eaux du Río Boconó sont moins appauvries en ^{18}O que celle du Burate, elles sont plus chaudes et plus riches en Cl et Na; Ce résultat s'explique par la trajectoire des masses nuageuses (chapitre IV) qui atteignent d'abord le Haut Boconó et accessoirement la confluence Boconó/Burate puis s'engouffrent ultérieurement dans la vallée du Burate. Les nuages qui arrosent la vallée du Burate sont donc appauvris en ^{18}O et probablement en Cl; ils se sont refroidis par augmentation de l'altitude. Cependant, malgré ces écarts systématiques, l'amplitude des variations est comparable entre les deux rivières.

Le groupe du potassium et du nitrate

Le potassium et le nitrate sont opposés au premier groupe de paramètres (fig. VI.21), ce qui suggère une opposition entre des origines profonde ou superficielle et non géographique comme c'est le cas pour le premier groupe. Compte tenu des conditions de transport depuis le Vénézuéla, les concentrations en nitrate et phosphate seront considérées comme non représentatives de la réalité du terrain.

Les concentrations de ce paramètre ne sont pas importantes mais leurs variations sont significatives. Elles suivent très bien les augmentations de débit. A chaque augmentation de débit correspond un accroissement de cet élément. La première partie de la crue, régime de base, montre des écoulements à faible concentration. Il est fort probable que ces faibles teneurs soient liées à une origine profonde et donc pauvre en potassium. Le premier pic de cette étape est caractérisé par une augmentation relativement importante mais brève. La forêt et les cultures sont à l'origine de ces premières concentrations. Les bassins versants des torrents localisés sur le versant du Guaramacal qui contribuent par leurs débits dans cette partie de la crue, sont occupés par de vastes extensions de forêt. Les eaux suivantes jusqu'au débit de pointe présentent les teneurs les plus importantes de l'épisode. Le tarissement s'établit ensuite progressivement et, comme le débit, les concentrations reviennent au niveau de base.

L'interprétation des variations de teneurs en nitrates est délicate pour les raisons évoquées plus haut. Cependant, il est possible d'apercevoir deux augmentations pendant la phase de montée de débit. Ce paramètre est associé à une origine biologique ou agricole.

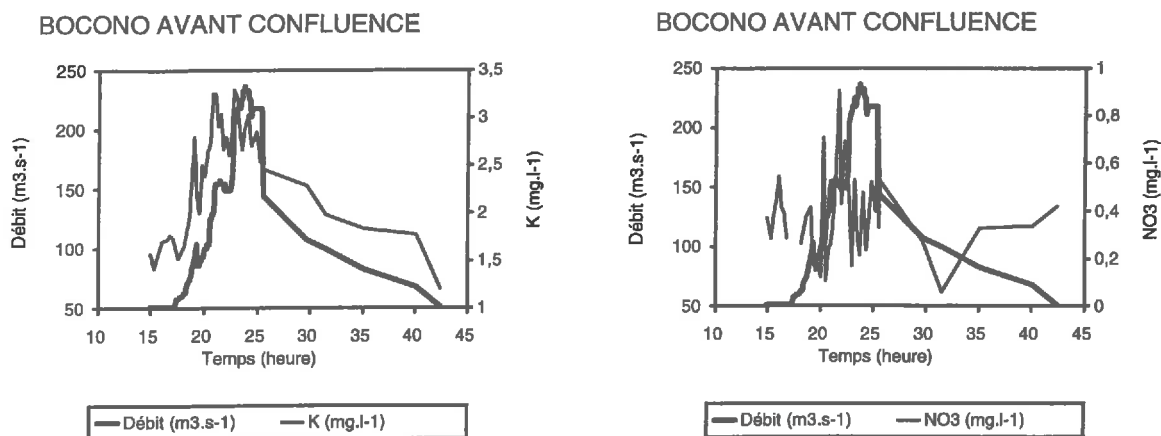


Figure VI.21: Evolution du potassium et du nitrate lors de la crue du Boconó du 09-10 juillet 1995.

Le magnésium

Le magnésium présente une position intermédiaire entre le premier et le deuxième groupe du premier plan factoriel de l'A.C.P. Cependant il existe de fortes similitudes entre ce paramètre et la conductivité électrique. La différence la plus remarquable dans le comportement de cet élément est la présence des écoulements concentrés en magnésium dès le début de la crue (Fig. VI.22). Ceci montre un mélange entre les eaux diluées provenant de haute altitude et les eaux concentrées proches de l'exutoire. Durant la crue, la proportion varie au profit des écoulements dilués. En effet, dans l'étude temporelle du Burate, il a été possible d'identifier un enrichissement des eaux en magnésium issu des lutites et des matériaux volcanoclastiques qui constituent le versant du Guaramacal. De même, pour cette phase de montée de la crue du Boconó, le mécanisme semble être le même. A partir de la montée du débit de pointe, ce paramètre diminue brusquement montrant l'arrivée d'un réservoir géographique pauvre en magnésium typique de roches cristallines. Lors du tarissement, comme pour les autres paramètres, les teneurs en magnésium reviennent aux valeurs initiales.

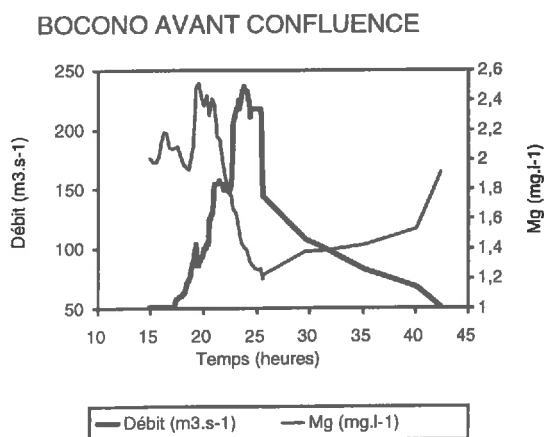


Figure VI.22: Evolution du magnésium lors de la crue du Boconó du 09 au 10 juillet 1995.

Le groupe de l'alcalinité résiduelle calcite (A.R.C.) et de la pCO₂.

Ce groupe de paramètres est hétérogène (Fig. VI.23). La pCO₂ des eaux marque une opposition entre l'origine profonde ou superficielle, alors que l'A.R.C. constitue un bon

traceur de l'opposition entre les zones de production d'acidité par oxydation des pyrites et les zones d'altération des roches cristallines.

Les premiers prélèvements indiquent des écoulements peu chargés en CO_2 , ce qui confirme que le régime de base est alimenté par les zones cristallines. Dès qu'arrive la montée des débits, pendant les deux premiers pics de crue, les eaux sont plus riches en CO_2 . Ce mécanisme confirme l'origine des torrents Chandá et Segovia situés sur matériaux lutitiques où l'activité microbienne oxyde le carbone organique fossile présent dans ce matériau. Quand ces deux contributions riches en CO_2 cessent, surviennent des écoulements qui sont de plus en plus pauvres en CO_2 . Lors du débit de pointe et du début de la décrue, la pCO_2 est nettement plus faible indiquant des contributions pauvres en CO_2 . Cette observation renforcerait l'hypothèse d'une origine des secteurs de roches cristallines durant cette phase; les eaux proviendraient alors du secteur situé entre le torrent Toro et río Blanco. Lors du tarissement la pCO_2 évolue vers les valeurs observées lors du début de la crue.

L'alcalinité résiduelle calcite (A.R.C.) informe plutôt sur l'origine géographique des eaux. C'est un paramètre intéressant en temps que traceur, des processus d'acidification ou d'alcalinisation.

Les premiers prélèvements qui correspondent au régime de base sont les eaux les plus alcalines de l'épisode, confirmant une origine de zones d'altération des roches cristallines ou de schistes non lutitiques. Ce résultat est identique à celui observé en 1994.

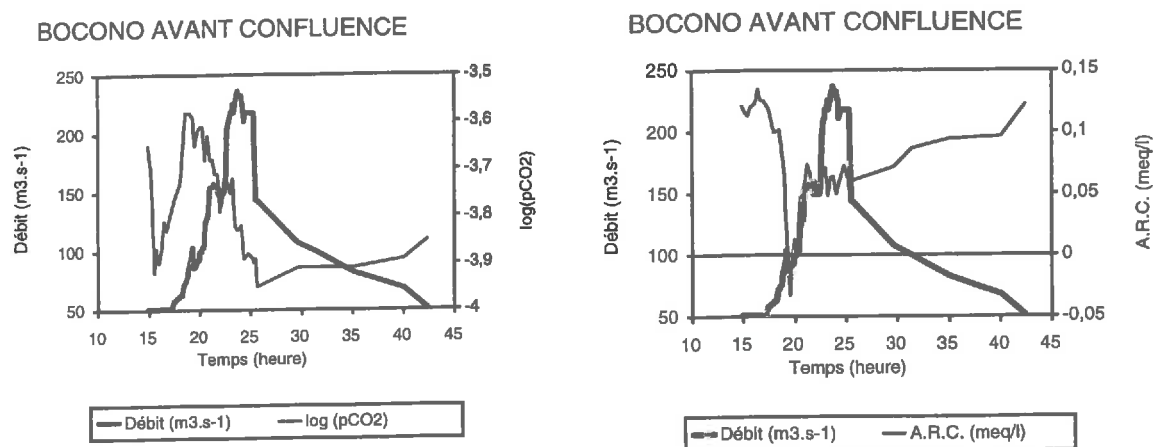


Figure VI.22: Evolution de l'Alcalinité Résiduelle Calcite et de la pCO_2 lors de la crue du Boconó du 09-10 juillet 1995.

Dès qu'apparaît le premier pic de la montée de débit, l'A.R.C. chute et atteint des valeurs négatives. Comme pour le Burate, ces eaux aux teneurs négatives seront liées aux processus d'acidification qui se produisent au sein des matériaux lutitiques. Dans le cas de Boconó, un pic négatif bref de l'A.R.C. indique une localisation spatiale bien précise de ces contributions. Les écoulements issus des torrents comme Chandá, constitués d'une lithologie lutitique avec de éléments pyriteux, pourrait produire des faciès semblables à ceux du torrent Jarillos, localisés dans la branche Burate. Enfin, les mesures réalisées en 1994 en amont de la confluence des torrents provenant des secteurs lutitiques n'ont données aucune valeur négative de l'A.R.C., ce qui confirme que les eaux responsables de ces valeurs négatives débouchent entre la ville de Boconó et la confluence Boconó/Burate/Corojó.

Après ce pic, l'A.R.C. augmente légèrement avec le débit. En effet, à partir du second pic de la montée de débit et pendant toute le débit de pointe l'A.R.C. devient stable, marquant ainsi des écoulements bien différenciés par rapport au reste de la crue. Ces contributions issues de roches cristallines présentent une légère alcalinité résiduelle. Cette remarque permet de différencier ces eaux de celles provenant de la formation lutitique du versant Guaramacal ou

celles du secteur río Negro constitué des roches cristallines dans sa partie amont. Le secteur de la haute vallée du río Negro emmagasine une nappe alluviale qui provoque une stagnation de l'eau et un léger changement dans l'alcalinité carbonatée.

Mais ce paramètre a rendu compte de cette différence. D'ailleurs, lorsque le tarissement survient il est possible de distinguer la contribution de la haute vallée du río Negro car les valeurs de l'A.R.C. sont analogues à celles du début de crue. Autrement dit, l'origine des écoulements des premiers prélèvements (régime de base) et ceux du tarissement est le même. Elle concerne les contributions de la nappe alluviale de la haute vallée du río Negro.

6.3.3 Le suivi et la caractérisation des M.E.S.

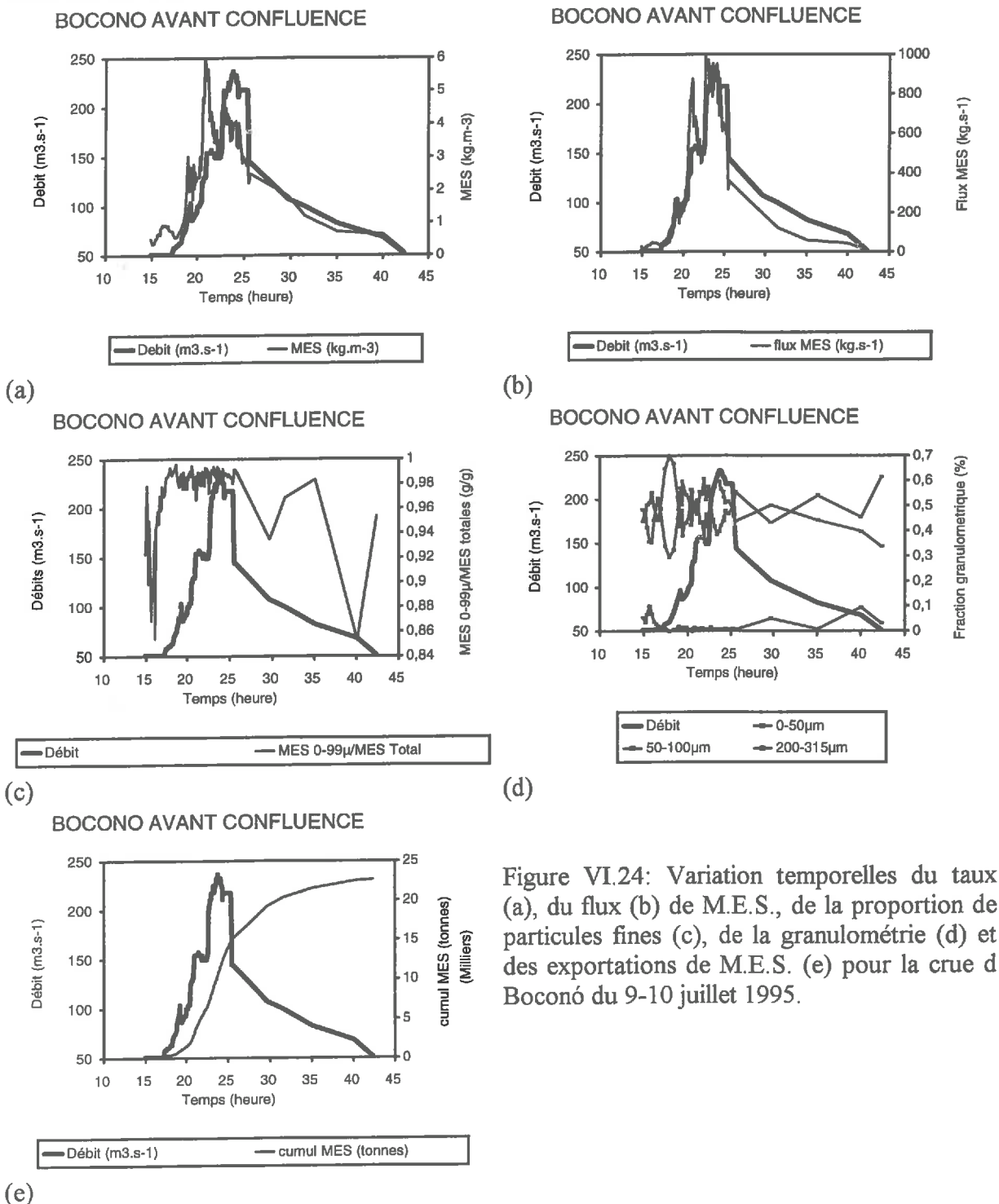


Figure VI.24: Variation temporelles du taux (a), du flux (b) de M.E.S., de la proportion de particules fines (c), de la granulométrie (d) et des exportations de M.E.S. (e) pour la crue d Boconó du 9-10 juillet 1995.

Pour des bassins pédologiquement contrastés, l'observation de la couleur des matières en suspension peut donner des informations sur l'origine des écoulements (Ribolzi *et al.*, 1995). Pour cette crue, elle est grise traduisant la présence de matériaux organiques fossiles. Cependant, la coloration est nettement moins foncée que celle du Burate ou du torrent Corojó, ce qui indique un mélange avec des matériaux ayant une autre origine.

Il convient de remarquer, que les sédiments véhiculés en 1994 jusqu'au pont El Zumbador de la ville de Boconó, avaient une teinte beige plus jaune et plus orange. Cette différence de coloration entre les deux points de prélèvement doit être reliée à l'arrivée de deux torrents en provenance du massif du Guaramacal, quebradas Segovia et Chandá, dont le comportement et le type de M.E.S. sont comparables à ceux du torrent Corojó.

Les taux de matière en suspension sont nettement moins élevés que pour le Burate; l'écart est d'un facteur 5 (fig. VI.24 a). Les flux de M.E.S. sont aussi moins élevés ils ne dépassent pas 900 kg.s^{-1} (fig. VI.24 b). La courbe des exportations cumulées est elle même différente de celle du Burate (fig. VI.24 e). Elle se distingue par l'existence d'une phase marquée de mise en suspension des sédiments présents dans le lit de la rivière entre 15h00 et 20h00. De même, la phase de sédimentation à partir de 24h00 est relativement marquée, ce qui constitue une autre différence par rapport au régime du Burate.

La quantité totale exportée pendant la crue est de $22.6 \cdot 10^3$ tonnes soit 2.5 fois moins que pour le Burate sur la même période, alors que le volume d'eau écoulé est supérieur. La moitié de l'exportation de M.E.S. est atteinte avant 24h00, ce qui est beaucoup plus tardif que pour le Burate. La quantité totale exportée sous forme particulaire représente $62,1 \text{ tonnes/km}^2$. En revanche, l'exportation sous forme dissoutes représente 756 tonnes sur la crue, soit 1.3 tonne/km^2 , ce qui est beaucoup plus faible.

L'évolution temporelle de la granulométrie montre différentes phases (fig. VI.24 c et d). Le début de crue, est marqué par une mise en suspension de matériau du lit de la rivière de taille $>315 \mu\text{m}$. Mais lorsque survient le second pic, la proportion de la fraction fine augmente de manière importante. Ici, comme pour les torrents Jarillos et Corojó et la branche Burate, l'égalité de la fraction $0-50 \mu\text{m}$ et $50-100 \mu\text{m}$ constitue la signature des matériaux issus des zones lutitiques. Elle survient au moment où les écoulements provenant des torrents localisés sur le matériau lutitique contribuent à la crue. Le débit de pointe est constitué par des sédiments fins. C'est lors de la décrue que la proportion de fraction grossière augmente légèrement, cependant une forte proportion de M.E.S. fines persiste durant dans cette phase.

Evolution temporelle du C.O.P. dans la fraction 0-200 μm

Comme pour les autres sites étudiés, le C.O.P. C/N, le taux de C.O.P. et le $\delta^{13}\text{C}$, ont été dosés sur la fraction fine des M.E.S. (Fig. VI.25)

Les taux de C.O.P. les plus importants de l'épisode sont observés pour les premiers prélèvements, en début de crue. La valeur élevée du rapport C/N indique qu'il s'agit d'une matière organique fraîche, peu humifiée, probablement issue de litières. Le taux élevé de C.O.P. confirmerait cette hypothèse. Le $\delta^{13}\text{C}$ oscille autour d'une moyenne de $-24,5 \text{ ‰}$ suggérant un mélange entre des débris forestiers et en moindre proportion, des résidus de cultures du type C4 (maïs, canne à sucre). Ce sont donc des matériaux de surface.

Ces caractéristiques relativement stables jusqu'à 18h00 sont brutalement modifiées par l'arrivée du premier torrent issu du Guaramacal. Le taux de C.O.P. chute et le C/N évolue vers 12, ce qui indique l'arrivée d'horizons humiques moins organiques. Ce résultat rappelle les mécanismes observés sur les torrents et qui ont été attribués à l'apport de matériaux lutitique. Pour cette crue, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ voisines de $-25,5$ confirment ici aussi cette hypothèse. L'érosion attaque donc les couches profondes, il s'agit d'une érosion incisive.

Après ce petit pic de crue, le taux de C.O.P. augmente, le rapport C/N évolue vers des valeurs proches de 17 et le $\delta^{13}\text{C}$ se stabilise vers $-23,5$. Il s'agit alors d'horizons humifères

de zones forestières et dans une moindre mesure de champs de maïs. Les variations liées à l'arrivée du second petit pic, induit les mêmes effets que le premier, mais avec une intensité moindre. Il s'agirait donc de l'arrivée d'un second affluent avec à nouveau une érosion incisive dans des matériaux lutitiques.

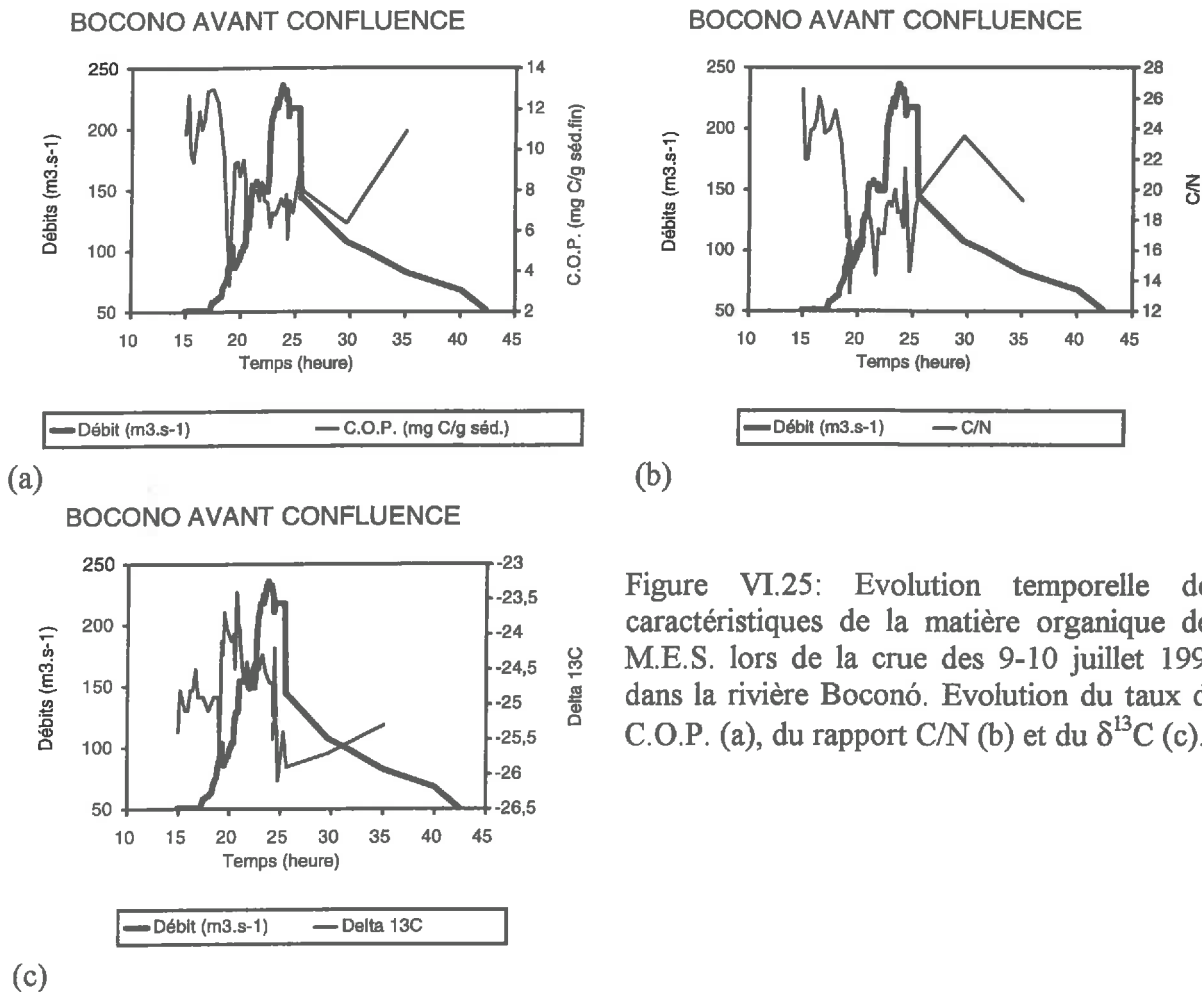


Figure VI.25: Evolution temporelle des caractéristiques de la matière organique des M.E.S. lors de la crue des 9-10 juillet 1995 dans la rivière Boconó. Evolution du taux de C.O.P. (a), du rapport C/N (b) et du $\delta^{13}C$ (c).

Lors du pic de crue et surtout en début de décrue, les caractéristiques de la matière organique indiquent l'arrivée d'un humus forestier. Enfin, lors du tarissement de la crue, les caractéristiques évoluent progressivement vers l'état initial.

Ainsi, cette crue du Boconó présente de fortes similitudes avec les mécanismes observés à l'échelle des torrents et du Burate. L'arrivée précoce de matériaux superficiel peu humifiés issus des zones forestières et cultivées de basse altitude puis humifié et donc moins superficiel précède une phase d'érosion mobilisant des couches plus profondes encore. Cette succession semble être une constante du processus d'érosion dans le bassin, aux diverses échelles d'observation. La différence entre les bassins versants élémentaires situés sur les pentes et les branches principales du réseau réside dans le fait que pour ces dernières, l'arrivée successive des ondes issues de chaque bassin élémentaire induit un cycle litière -> humus -> roche mère, ce qui induit une succession de cycles.

Synthèse de la crue du río Boconó

La crue 1995 du río Boconó présente de fortes similitudes avec celle de 1994. Comme pour le Burate, se succèdent des eaux provenant des zones proches de l'exutoire et plus riches en éléments dissous, puis des eaux d'origine plus lointaine, plus diluées et provenant des zones d'altération des roches cristallines et enfin les eaux du haut Boconó,

diluées mais légèrement moins que les précédentes. La typologie des traceurs et marqueurs pour la branche Boconó semble elle-même assez stable d'une année sur l'autre.

Tableau VI.3

Comparaison des exportations en M.E.S. et de la charge dissoute entre les rivières Burate et Boconó pour la crue du 9 au 10 1995.

Sous bassin	Année	Lame écoulée (mm)	Exportation M.E.S. (t/km ²)	Exportation C.T.D. (t/km ²)
Boconó	1994 (1 ^{ère} crue)	14,7	67,9	0,85
Boconó	1994 (2 ^{ème} crue)	14,9	65,6	0,92
Boconó	1995	19,7	62,1	1,3

Comme pour 1994, la crue 1995 du río Boconó se distingue de la crue du Burate par les proportions d'eau issues de chaque zone contributive. Les zones intermédiaires et la haute vallée constituent l'essentiel de l'approvisionnement en eau, alors que pour le Burate, ce sont les zones aval.

Ainsi, les grands traits du fonctionnement hydrologique de la branche Boconó semblent assez stables pour des crues de même importance.

Pour des crues de même importance, les bilans d'exportation d'eau, d'éléments dissous et particulaire ramenés au km², sont aussi comparables (Tableau VI.3).

6.4 Etude d'une crue à la confluence Boconó/Burate

L'épisode étudié est le même que celui du 9-10 juillet 1995, c'est à dire celui qui a servi pour l'étude des Rio Boconó et Burate. Les données relatives aux deux branches et à leur confluence sont disponibles au pas de temps de 5 mn. Les mesures et les prélèvements ont été réalisés 1 000 m environ à l'aval de la confluence (chapitre III). Pour des raisons de sécurité, il n'a pas été possible de prélever plus en aval de ce point.

6.4.1 Etude de l'hydrogramme.

L'hydrogramme (Fig. VI.26) ressemble à celui du Río Boconó mais présente deux pics très distincts.

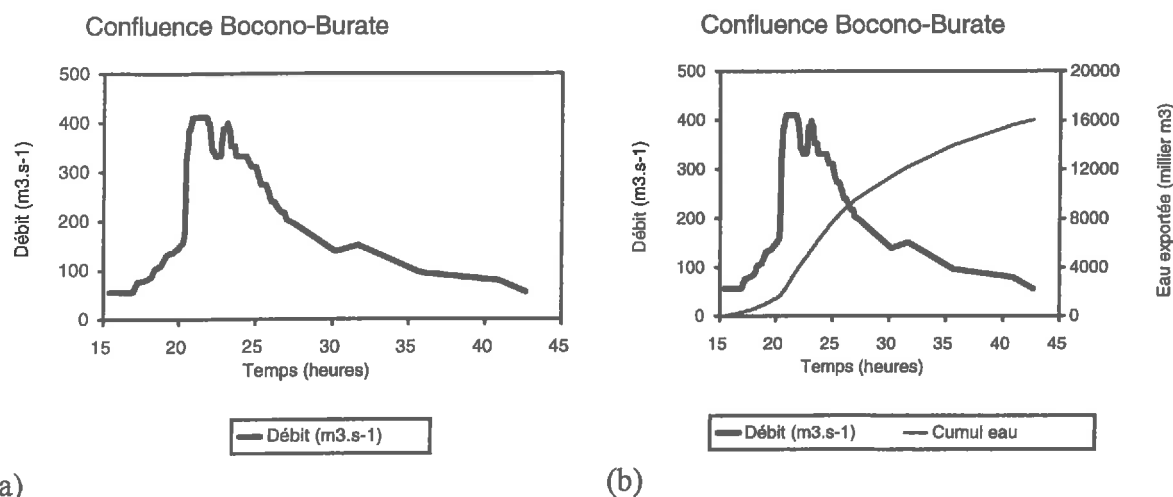
Après une montée progressive des débits, entre 15h00 et 20h40, une vague survient. Cette dernière est quasiment synchrone de la brutale augmentation des débits du Burate (§6.1) et doit être attribuée à cet affluent. Le premier pic de débit est cependant plus large que pour le Burate et dure de 20h40 à 21h45. Ceci s'explique par la montée assez rapide des débits observés vers 21h00 sur la branche Boconó avant la confluence et qui s'ajoute à la montée de crue du Burate.

Après une petite diminution des débits surtout entre 22h20 et 22h41, survient une nouvelle augmentation et le second débit de pointe à 23h06 atteignant des niveaux presque aussi élevés que le premier. Il correspond au pic de crue mesuré sur la branche Boconó.

La diminution des débits s'amorce alors. Elle est très étalée et s'interrompt entre 30h00 et 35h00 cumulées pour continuer lentement par la suite. Ce petit maximum de débit en fin de décrue vers 32h00 est synchrone de celui observé sur le Burate dont il semble résulter.

L'intégration de la courbe de débit permet d'estimer le volume d'eau exporté sur la crue à $16,1 \cdot 10^6$ de m³. Or les volumes cumulés calculés pour les deux branches sont de $11,3 \cdot 10^6$ m³ pour Boconó et $7,1 \cdot 10^6$ m³ pour Burate, soient $18,4 \cdot 10^6$ de m³. L'écart entre les deux

estimations est tout à fait acceptable. Ce bon accord est aussi lié à l'intercalibration des débits entre les deux branches réalisée sur cet épisode.



(a) (b)
Figure VI.26: Hydrogramme (a) de la confluence Boconó/Burate et volume d'eau exporté (b), lors de la crue du 9-10 juillet 1995.

6.4.2 Variations temporelles des paramètres physico-chimiques de la phase aqueuse

L'étude statistique des données réalisée à partir du premier plan factoriel de l'ACP qui représente 54,0+29,6 % de la variance, montre que les informations se regroupent autour de trois ensembles. Le premier et le plus important est constitué des paramètres CE/Ca/Alc/et SO4. Ces éléments sont fortement corrélés entre eux (SO4/Ca=0,95; SO4/Alc=0,93). Cl et Na constituent le second groupe avec un coefficient de corrélation de 0,81.

Le potassium présente une position singulière. Le magnésium et le phosphate sont intermédiaires entre les deux premiers groupes.

Le groupe de la conductivité électrique, du calcium, du sulfate et de l'alcalinité

Comme pour les autres sites étudiés, la conductivité électrique sera retenue comme représentative de ce groupe de paramètres (Fig. VI.27).

Les variations temporelles observées à l'aval de la confluence ressemblent beaucoup à celles observées pour la branche Boconó, mais présentent des valeurs intermédiaires entre celles mesurées sur les deux branches principales. La conductivité électrique augmente dès le début de la crue, ce qui traduit l'arrivée des eaux provenant des secteurs lutitiques (torrents Corojó, Chandá, Segovia,..). Le maximum est atteint vers 18h30 et se maintient au-delà de la contribution du Burate (20h30). C'est alors que les eaux plus diluées des secteurs centre-amont de Boconó et accessoirement de Tomón puis du haut Burate, respectivement vers 21h00, 22h00 et 24h00 arrivent et apportent les eaux diluées. Le minimum de conductivité électrique survient vers 26h00. La conductivité électrique augmente alors légèrement avec un maximum relatif vers 30h00 et ceci correspond à la légère reprise des débits du Burate et à l'arrivée des eaux du haut Boconó qui sont un peu moins diluées que celles du centre du sous bassin.

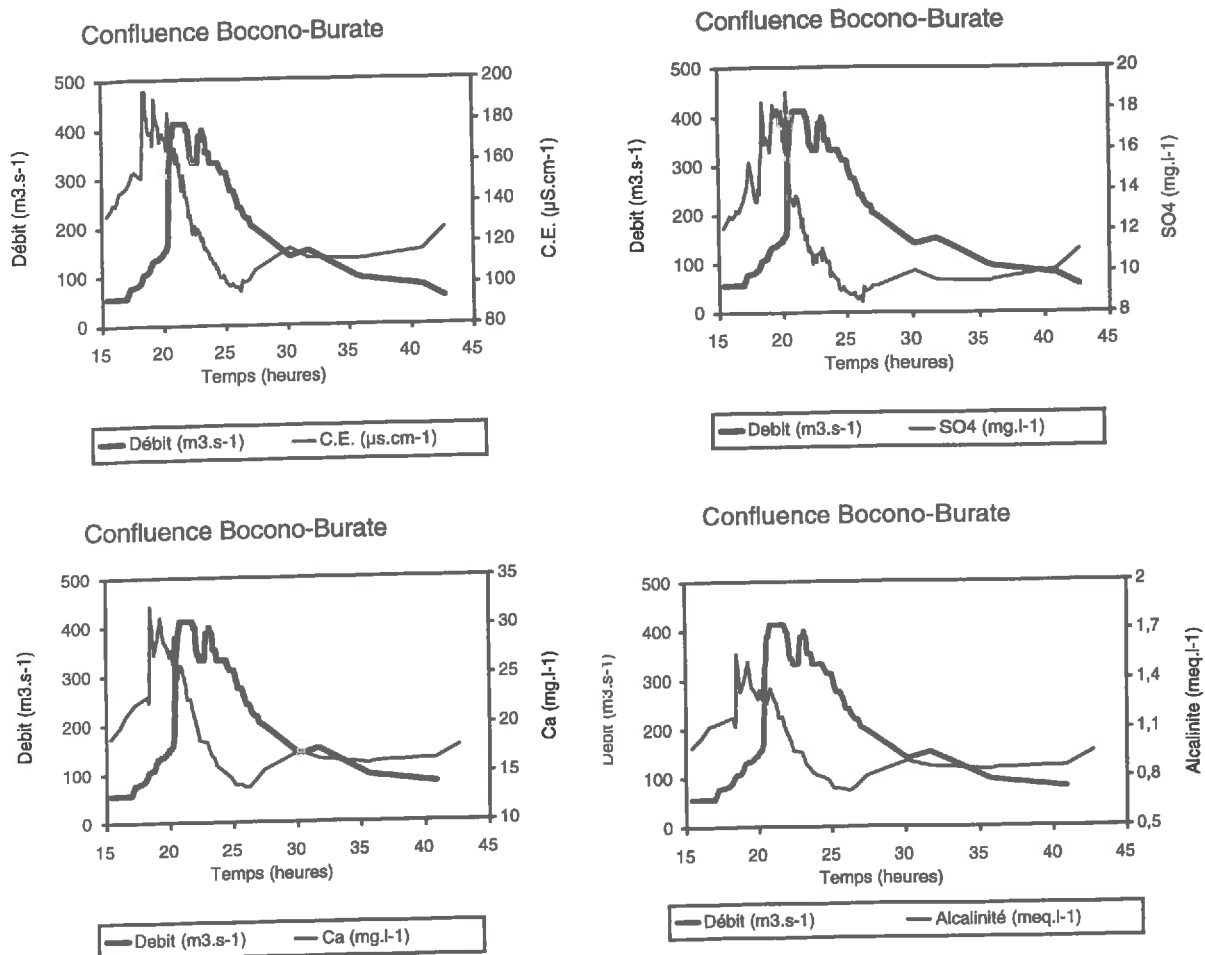


Figure VI.27: Variations temporelles du premier groupe de paramètres pour la confluence Boconó/Burate, lors de la crue du 9-10 juillet 1995.

Comparaison de la conductivité du mélange avec la conductivité des deux branches.

La comparaison entre les conductivités mesurées à la confluence et sur les branches Boconó et Burate (Fig. VI.28 a) montre que la valeur obtenue à la confluence n'est pas toujours comprise entre celles des deux affluents principaux. Ce résultat est surprenant au premier abord car l'eau de la confluence ne peut être assimilée comme un mélange entre les branches Boconó et Burate, ce qui interdit toute velléité de décomposition de l'hydrogramme pour vérifier la précision de la technique. L'explication de ce résultat est évidente lorsque l'on considère aussi la conductivité du torrent Corojó (Fig. VI.28 b). Les prélèvements de la confluence, réalisés sur la rive gauche du Boconó sont fortement influencés par l'apport du torrent Corojó sur la même rive, quelque 1 km en amont. Ainsi, à cette échelle là, le problème majeur ne provient pas de l'atténuation du signal à cause de l'effet de taille du bassin, mais plutôt du non respect de l'hypothèse de «bon mélange». Du fait de la largeur des cours d'eau principaux, le mélange entre les divers affluents d'une confluence ne se produit pas instantanément; il ne se réalise que progressivement.

Les bilans de masse d'eau sont corrects, mais pour les éléments dissous ou particuliers, ils ne sera pas possible de comparer les apports de chaque branche et ce qui transite par la confluence. De même, l'information véhiculée par les différents paramètres est altérée, ce qui réduit l'intérêt de l'étude des variations temporelles. Celle-ci sera donc réduite. Les résultats précédents ont montré que les prélèvements réalisés à la confluence sont un mélange mal homogénéisé entre le torrent Corojó, le Boconó et le Burate, par ordre décroissant de participation au mélange. La contribution apparente du torrent Corojó est

exacerbée lors de sa crue c'est à dire entre 18h30 et 20h00. Après cette période, la conductivité électrique tend plutôt vers celle de Boconó. Ainsi, du fait de cet artefact, il est probable que les variations temporelles des différents paramètres pour la confluence ressemblent à ceux observés pour la branche Boconó et éventuellement à Corojó entre 18h30 et 20h00.

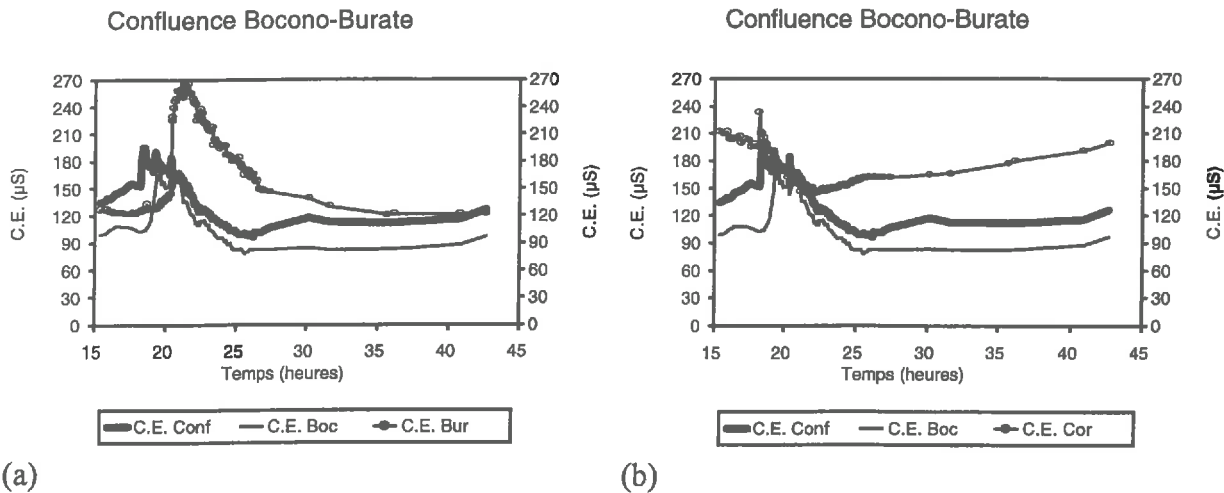


Figure VI.28: (a) et (b): Comparaison entre la conductivité électrique de la confluence et celle des différents affluents; CE Boc= Boconó; CE Bur= Burate; CE Cor= Corojó.

Le groupe du chlorure, du sodium, de la température et de $\delta^{18}O$

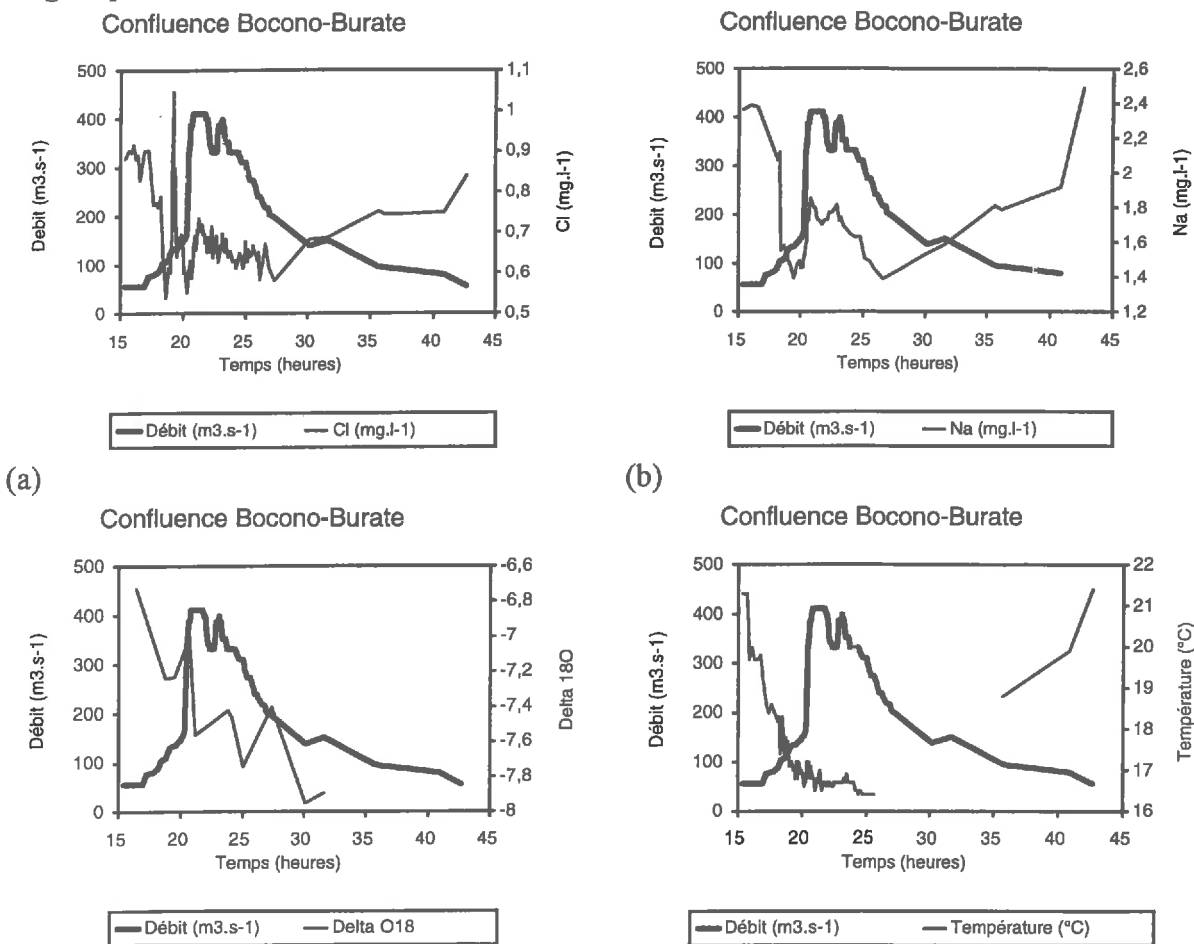
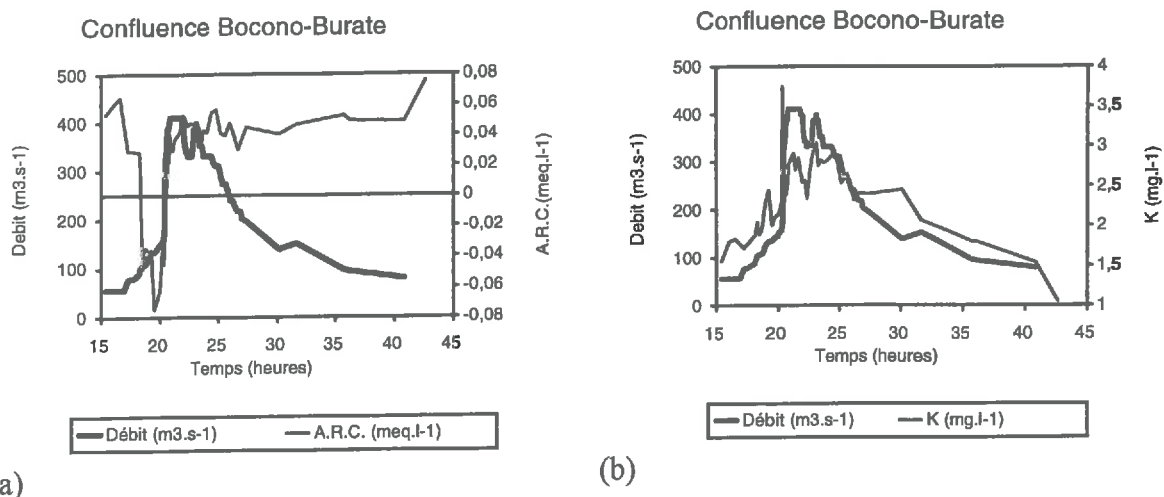


Figure VI.29: Variations temporelles du second groupe de paramètres chlorures (a); sodium (b); $\delta^{18}O$ (c); et température (d) à la confluence Boconó/Burate.

Les variations de ces paramètres (Fig. VI.29 a,b,c et d) ressemblent fortement à ceux obtenus pour la branche Boconó. Pour l'essentiel, elles constituent une répétition des mesures réalisées sur la branche Boconó, ce qui confirme la mauvaise qualité du mélange entre les affluents. La signification de ces variations a été détaillée dans le sous-chapitre précédent.

Les variations de l'alcalinité résiduelle calcite (Fig. VI.30) montrent un régime de base alimenté par des eaux alcalines provenant des zones hautes des branches Boconó et Burate. Au début de la montée de crue, lors des contributions des torrents Corojó, Chandá, Segovia,.. l'ARC devient brusquement négative montrant l'arrivée d'eaux acidifiées par l'oxydation de pyrite contenues dans les lutites.

Avec l'arrivée de l'onde provenant du Burate puis du Boconó, l'ARC retrouve des valeurs positives. Le potassium quant à lui augmente avec le débit. Comme pour les divers cours d'eau étudiés jusqu'à présent, chaque phase d'augmentation de débit se traduit par un pic de potassium.



(a) (b)
Figure VI.30: Variations temporelles de l'alcalinité résiduelle calcite (a) et de la teneur en potassium (b).

Evolution des M.E.S.

Les taux et les flux de M.E.S. ont été représentés sur la figure VI.31. Les résultats sont proches de ceux obtenus pour le Boconó à l'exception de ceux concernant la phase d'arrivée des eaux du Burate. A ce moment précis, le taux de M.E.S. croit jusqu'à 10 kg.m^{-3} ce qui est proche des valeurs mesurées dans le Burate (30 kg.m^{-3}) mais nettement plus faible. Ce phénomène particulièrement bref peut être attribué à la percée momentanée du flux du río Boconó par la vague provenant perpendiculairement du Burate.

Il ne peut s'agir d'un simple mélange car dans ce cas, le pic de M.E.S serait plus durable, comme dans le cas du Burate.

Les exportations cumulées de M.E.S sont estimées à 40,0 mille tonnes, contre 56 mille tonnes pour le Burate et 22,6 mille tonnes pour la branche Boconó pour la même période. Ces chiffres montrent que la conservation de masse n'est pas assurée et ceci du fait du mauvais mélange au niveau du point de prélèvement. Ainsi, le taux de M.E.S. mesuré est-il largement sous estimé.

Pour les exportations de charge totale dissoute, les résultats vont exactement dans le même sens. La quantité C.T.D. exportée est de 1 505 tonnes contre 1 120 tonnes pour le Burate et 756 tonnes pour la branche Boconó.

Ainsi, si les bilans de masse sont respectés pour l'exportation d'eau, le mauvais mélange au point de mesure conduit à un défaut de bilan pour les exportations de matières en suspension et de matières dissoutes.

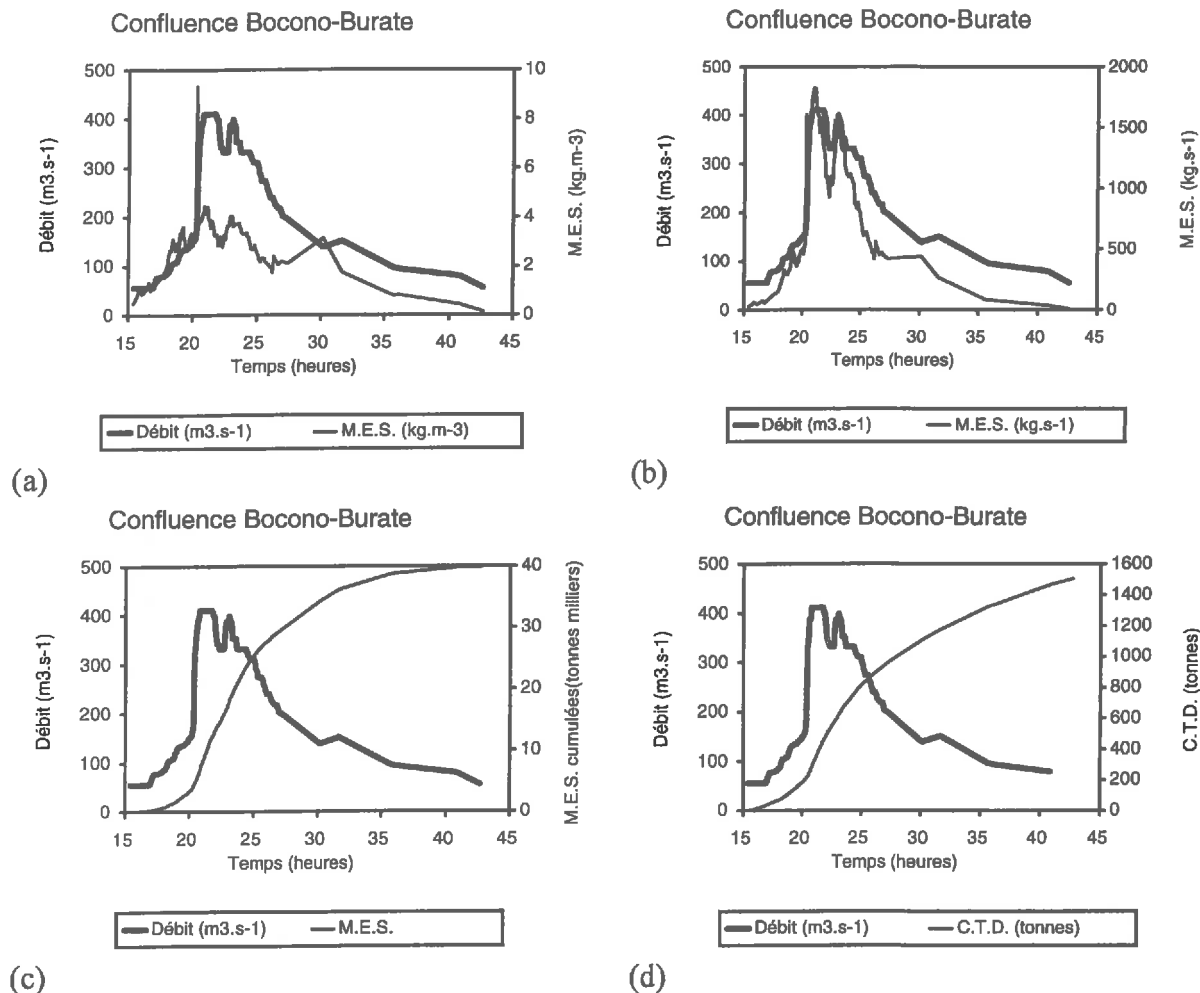


Figure VI.31: Evolution du taux (a) et du flux de M.E.S. (b) à la confluence Bocono-Burate. Estimations des exportations cumulées de ME.S. (c) et de charge totale dissoute (d).

Conclusion sur la crue à la confluence Bocono-Burate

L'intérêt de l'étude de cette série de mesures a été diminué par le problème de représentativité des échantillons du fait du mauvais mélange entre les eaux des divers affluents au niveau du point de mesure.

Cependant quelques points émergent.

Le premier est le fait que les signaux isotopiques et chimiques ne sont pas encore atténués par l'effet d'échelle malgré la surface drainée qui atteint 950 km². Au contraire, les variations temporelles peuvent être particulièrement nerveuses. Ce résultat encourage l'utilisation des traceurs naturels dans de tels bassins versants torrentiels pour de grandes surfaces.

En revanche, les problèmes de traçage naturel qui se développent avec l'augmentation de taille du bassin et par conséquent de la taille des rivières, est le phénomène d'hétérogénéité au sein de la section, bien en aval de la confluence malgré le brassage important de ces milieux torrentiels. Ceci n'affecte pas le bilan de masse de l'eau car la pression se transmet rapidement dans la section du chenal. L'estimation du bilan de masse des éléments dissous et surtout des M.E.S. est par contre très biaisé.

Enfin, cet écoulement séparé des eaux provenant de deux affluents peut être momentanément brisé lorsqu'une vague violente de direction perpendiculaire à l'axe principal survient.

6.5 Etude d'une crue à l'entrée du barrage «Peña Larga»

L'intérêt de cette crue réside dans le fait qu'elle intègre tout le bassin versant. Les observations, les prélèvements et les mesures ont été réalisés à l'exutoire du bassin versant, c'est à dire à l'entrée du barrage. Il s'agit donc d'une extension à des surfaces plus importantes que celles traitées précédemment. Ce paragraphe permettra d'apprécier si le traçage naturel est encore possible pour une surface drainée de 1 540 km². Ceci clôture la démarche de changement d'échelle pour l'étude des crues ouverte par le torrent des Jarillos.

Les mesures ont été réalisées dans des conditions difficiles d'accessibilité et de sécurité. Elle n'auront donc pas la même finesse que pour les sous chapitres précédents.

6.5.1 Etude de l'hydrogramme

L'hydrogramme (Fig. VI.32) a été obtenu par dérivation de la courbe de remplissage de la retenue lors de la crue. A partir du relevé de hauteur d'eau au pas de temps de cinq minutes et à partir de la surface mouillée, il a été possible d'estimer les débits. Cette méthode indirecte est moins précise que celles utilisées pour les autres sites. Cependant, elle donne des ordres de grandeur et permet de localiser les crues dans le temps. Seuls les moments approximatifs du pic de crue ainsi que les ordres de grandeur des débits doivent être considérés.

La crue est connue en amont sur la branche Boconó. Il s'agit d'une crue multiple le 15 juillet suivie d'une crue apparemment unimodale le 16 juillet 1994.

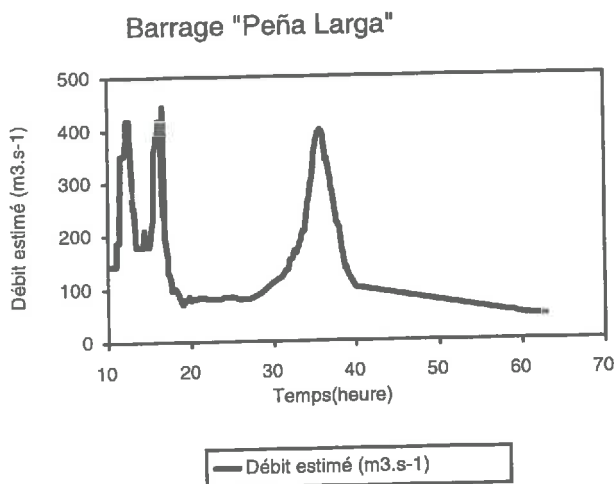


Figure VI.32: Hydrogramme estimé à partir de la vitesse de remplissage de la retenue de Peña Larga les 15-16 juillet 1994.

6.5.2 Variations temporelles des éléments chimiques dissous

L'ACP réalisée sur l'ensemble des paramètres montre un regroupement maintenant classique pour ce bassin sur le premier plan factoriel qui représente 54,4+28,0% de la variance.

Le premier groupe est constitué par le sulfate, le calcium et l'alcalinité auxquels se rattachent de façon plus lointaine la conductivité électrique, le sodium et le magnésium. Le potassium s'individualise malgré sa proximité du groupe Ca/SO₄/Alcalinité. Il en va de même pour le chlorure situé à l'autre extrême mais qui est proche de Na et Mg.

Lors de l'étiage, entre les deux crues, les eaux sont relativement diluées quelque soit le paramètre chimique (Fig. VI.33). Avec l'arrivée de la seconde crue, les teneurs en sulfate, sodium et magnésium augmentent légèrement. Ces eaux de concentrations moyennes

proviennent du versant sud du Guaramacal, qui est très arrosé et donc lessivé, composé de roches sédimentaires ce qui enrichit les eaux en éléments solubles. Au moment du pic de crue les teneurs en éléments dissous, notamment en sulfate, augmentent brusquement.

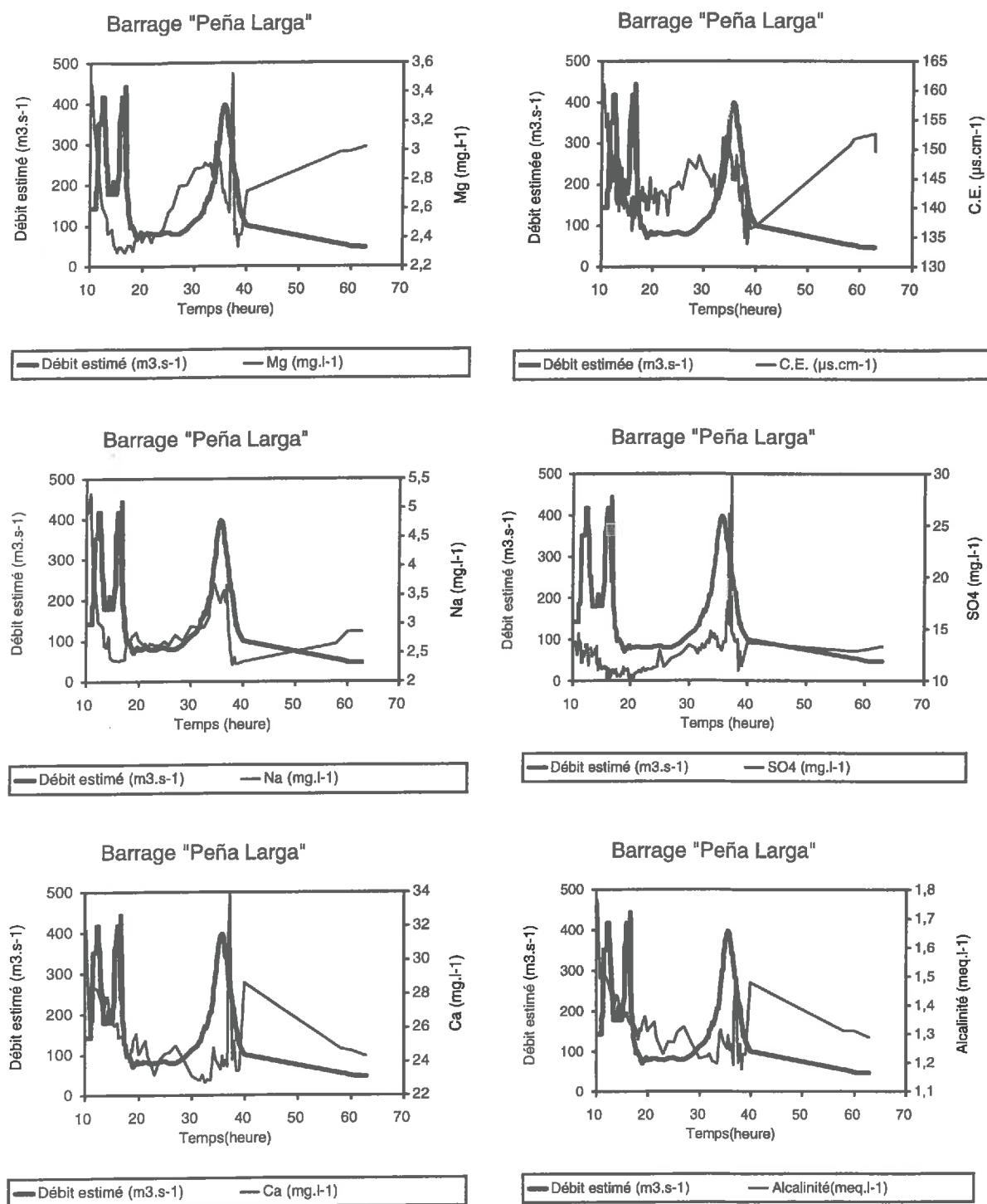


Figure VI.33: Variations temporelles des teneurs en éléments dissous à l'exutoire du bassin versant, barrage «Peña Larga» lors des crues du 15-16 juillet 1994.

Ceci traduit l'arrivée d'eaux plus lointaines probablement du Burate riches en sulfate et caractérisées par une alcalinité résiduelle calcite négative (Fig. VI.34). Juste après cette contribution, des eaux plus diluées, de teneurs proches à celles du régime de base atteignent

l'exutoire, elles peuvent provenir du Boconó dont les eaux sont toujours plus diluées que celles du Burate. Comme pour la confluence Boconó/Burate, l'arrivée des ondes de chaque branche induit un pic de potassium.

Les variations observées lors de la première crue sont comparables à celles décrites précédemment.

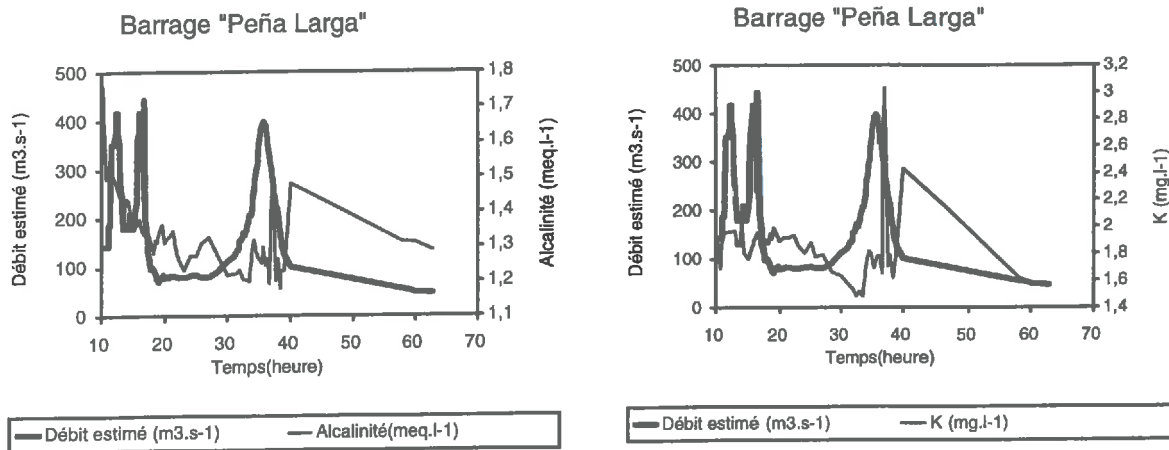


Figure VI.34 Variations temporelles de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (A.R.C.) et du potassium lors des crues des 15-16 juillet 1994 à l'entrée du barrage «Peña Larga».

6.5.3 Le suivi et la caractérisation des M.E.S.

Les variations du taux et du flux de M.E.S. ainsi que les quantités totales exportées ont été reportées sur la figure VI.35.

Dans le cas de l'entrée dans la retenue, l'interprétation de ces variations est très différente de celle des autres sites. En effet, les M.E.S. transportées proviennent non seulement de la crue étudiée mais aussi, de la remise en suspension des sédiments déposés lors des crues précédentes. Les observations de terrain réalisées lors de la crue ont révélé que le Boconó entaille les sédiments sableux déposés à l'entrée de la retenue, faisant écouler des pans entiers de matériaux des berges, sur plusieurs mètres de hauteur, qui s'effondrent dans le lit de la rivière. De même, la turbulence moindre sur ce site que pour la partie montagnarde, induit une hétérogénéité du taux de M.E.S. dans la section (Chapitre III), tant verticalement que latéralement, ainsi qu'une différenciation nette entre suspension et charriage.

Ainsi, les taux de M.E.S. semblent-ils essentiellement corrélés au débit, avec un effet retard sur les transferts d'eau. Ainsi, le maximum du taux de M.E.S. correspond au maximum des teneurs en sulfate et au pic d'alcalinité résiduelle calcite négative et doit être attribué à la contribution du Burate.

Pour la première crue, l'arrivée de la seconde vague induit un petit arrêt de la décroissance de ce taux, et même une légère remontée de ce dernier.

Les quantités exportées sont très imprécises du fait des imprécisions cumulées sur le débit et sur le taux de M.E.S. moyen de la section. Elles sont du même ordre de grandeur que celles qui furent mesurées simultanément en amont sur la branche Boconó. Cependant du fait de l'imprécision, il convient de ne pas tenter de comparaison.

Conclusion sur les crues des 15-16 juillet 1994 à l'exutoire.

L'étude de cette crue à l'exutoire souffre de faiblesses essentiellement liées à la méconnaissance précise des débits liquides. Cependant, elle permet de confirmer que même à cette échelle, les signaux chimiques ne sont pas amortis. Le traçage est donc possible à cette échelle. Par ailleurs, la succession des ondes de conductivité différentes, de fortes conductivités

provenant des zones sédimentaires suivies par les eaux provenant des massifs cristallins d'altitude, a été retrouvée à l'entre dans la retenue, ce qui montre la stabilité des ces processus lors du changement d'échelle.

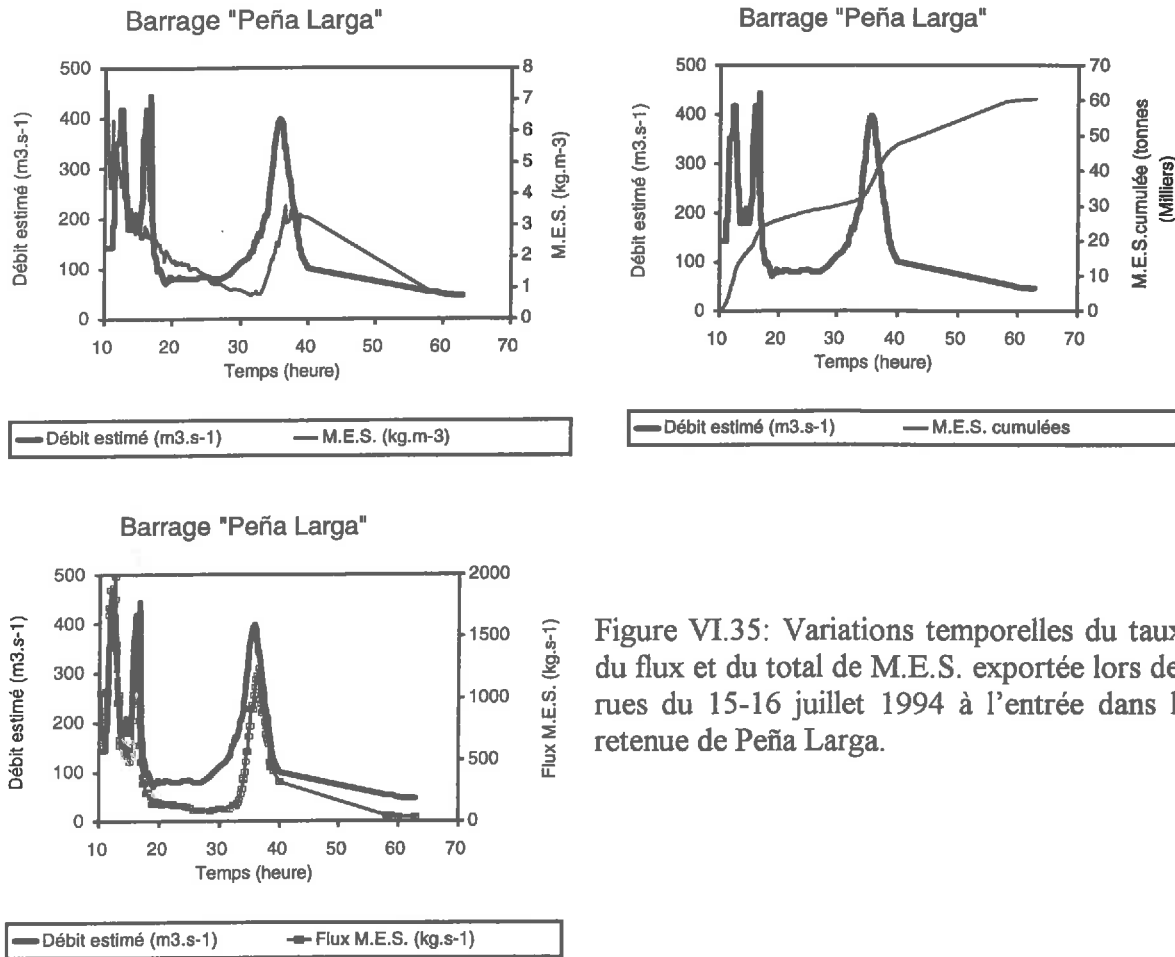


Figure VI.35: Variations temporelles du taux, du flux et du total de M.E.S. exportée lors des crues du 15-16 juillet 1994 à l'entrée dans la retenue de Peña Larga.

Conclusion et synthèse préliminaires sur l'étude des crues:

L'arrivée précoce des eaux chargées en éléments dissous issues des zones sédimentaires du Guaramacal, puis des zones diluées provenant des secteurs cristallins ou métamorphiques est une constance entre les torrents Jarillos et Corojó, le Burate et la branche Boconó. Ce qui change c'est la proportion variable des zones contributives. La majeure partie de l'eau provient des zones lutitiques du secteur Vitisay situées à l'aval du Burate, alors que l'essentiel des flux d'eau proviennent des zones amont pour le Boconó. Cette opposition presque caricaturale est liée à la distribution spatiale des pluies elle-même dépendante de la circulation des masses nuageuses.

De même à partir des décomposition sommaires des hydrogrammes de crue, il est possible d'estimer les exportations d'eau, d'éléments dissous ou particuliers issus des principaux secteurs (Tableau IV.4). Ces résultats seront confirmés par les simulations présentées dans les paragraphes ultérieurs.

Tableau VI.4
 Comparaison des exportations en M.E.S. et la C.T.D. entre les rivières Burate et Boconó pour la crue du 09 au 10 1995.

Sous bassin	Année	Lame écoulée (mm)	Exportation M.E.S. (t.km ⁻²)	Exportation C.T.D. (t.km ⁻²)
Boconó	1994 (1 ^{ère} crue)	14,70	67,90	0,85
Boconó	1994 (2 ^{ème} crue)	14,90	65,60	0,92
Boconó	1995	19,70	62,10	1,30
Tomon-Tirindi *	1995	12,32	88,14	2,64
Vitisay *	1995	66,00	883,00	10,60
Haut Burate *	1995	13,40	73,18	1,78
Burate	1995	18,90	178,60	3,08
Moyenne du bassin versant	1983-1995	1 590	4 220	118,8

Les lignes marquées par* correspondent à des estimations effectuées à partir de la décomposition des hydrogrammes.

Les résultats font apparaître une certaine homogénéité de comportement à précipitation égale. Ainsi, les deux crues de 1994 sur la branche Boconó, celle de 1995 ou bien les contributions des secteurs haut Burate, ou Tomón, tous situés essentiellement sur matériaux cristallins ou métamorphiques présentent des exportations spécifiques comparables, tant en terme d'éléments dissous que de M.E.S.

En revanche, l'existence d'un secteur comme celui de Vitisay avec des sols très sensibles à l'érosion et des eaux chargées est suffisant à lui seul pour créer une différence d'exportation spécifique entre Boconó et Burate. Cette forte hétérogénéité spatiale doit être prise en compte lors de la comparaison entre les deux branches principales de la partie montagnarde du Burate.

Cette variabilité spatiale a pu être partiellement quantifiée aussi bien par l'étude préliminaire en période de régulation (chapitre IV) que lors des crues (Chapitres V et VI). Elle doit attirer l'attention sur la variabilité temporelle des mécanismes de transferts. En effet, si la plupart des épisodes étudiés dans les chapitres V et VI sont représentatifs de crues moyennes, il paraît indispensable de tenter un bilan décennal des exportations de MES afin de vérifier les ordres de grandeur des exportations solides. Ceci sera l'objet du prochain paragraphe.

Avant de réaliser ces estimations il apparaît convenable de établir une comparaison entre les apports en M.E.S et C.T.D. du Boconó et ceux du bassin versant de l'Orénoque, car c'est sont les affluents qui proviennent des la chaîne andine qui fournissent l'essentiel des éléments solides et dissous à l'Amazonie et l'Orénoque (Guyot *et al.*, 1993). Ainsi le bassin versant du Boconó représente 8% de la surface des Andes vénézuéliens.

Tableau VI.5
 Principales caractéristiques et comparaison des exportations en M.E.S. et C.T.D. entre le bassin versant de l'Orénoque (Depetris et Paolini, 1991) et la rivière Boconó

	Surface (10 ³ .km ⁻²)	Longueur (Km)	Débit (m ³ .s ⁻¹)	Flux M.E.S. (10 ⁻⁶ t.an ⁻¹)	Flux dissous (10 ⁻⁶ t.an ⁻¹)	Flux C.O.P. (10 ⁻⁶ t.an ⁻¹)
Boconó	1,4	90	77,65	7	0,183	0,875
Orénoque	1 000	2 150	36 000	150	30,5	1,93

6.6 Estimation du flux moyen annuel des Matières En Suspension (M.E.S.)

Lors des sous chapitres précédents, les mécanismes étudiés sur de petits bassins versants ont été confrontés à des surfaces de plus en plus grandes jusqu'à atteindre l'ensemble du bassin versant du Río Boconó. Cette démarche permet d'apprécier la représentativité spatiale de l'étude fines des transferts telles qu'elle peut être abordée sur un sous bassin. De même, les événements étudiés sont en général représentatif des crues ayant une fréquence retour annuel, et concernent des échelles temporelles de l'ordre de la journée. Il convient d'essayer d'étendre l'échelle temporelle à des durées plus importantes. Dans ce paragraphe, les ordres de grandeurs des exportations de M.E.S. seront estimées sur une période décennale par une méthode totalement indépendante des mesures de flux. de MES utilisées à l'échelle des crues.

La retenue de Peña Larga constitue un énorme piège à sédiments. Tous les solides transportés en suspension ou par charriage de fond sont accumulés et archivés pour toutes les crues survenues depuis 1983, date de mise en eau du barrage. Pendant cette période, aucune crue exceptionnelle n'a eu lieu puisque la dernière date de 1981. Aussi, aucune référence sur l'impact de ce type de crue de fréquence décennale sur le transport de M.E.S. n'est disponible.

L'étude des fréquences de crues réalisée par Velásquez et son équipe pour la partie amont a permis de vérifier que les épisodes étudiés en 1995 et 1994 sont proches de la moyenne en terme de débit liquide. Cependant, il convient de juger de la représentativité de ces crues en terme de bilan du transport des M.E.S., par rapport à un bilan annuel. Il est nécessaire au préalable de vérifier si les caractéristiques des sédiments sont susceptibles d'évoluer après leur dépôt.

6.6.1 Description de sédiments

A l'entrée du Boconó dans le barrage quelques rares galets ont pu être observés. L'essentiel des matériaux grossiers sont déposés quelques kilomètres en amont entre la confluence avec le Río Anús et la partie nord de la retenue.

Sur l'ensemble des dépôts de la retenue, on observe une alternance de sables grossiers et de sables plus fins riches en carbone. Cette alternance concerne aussi bien les sédiments récents que les dépôts plus anciens. Pour ces derniers, cette distribution verticale est d'autant mieux marquée que la position topographique est élevée.

Compte tenu du climat très chaud et humide des *llanos* (plaine vénézuélienne) le développement de la végétation après le dépôt de sédiments par une crue est très rapide. Il commence par des carex pour les zones facilement inondables et par des saules en zone plus haute.

Ce développement rapide de la végétation produit beaucoup de matière organique qui se dépose au sol ou est mêlée au sédiment des crues suivantes par érosion des berges. La décomposition rapide de ces matériaux induit des processus de réduction marquée en particulier pour les minéraux ferreux. La solubilisation poussée du fer peut être observée partout sur les sédiments du barrage avec une intensité d'autant plus forte que la position dans le paysage est basse.

Le phénomène de reprise des sédiments anciens par les crues récentes conduit à un mélange des matériaux. Ce mécanisme est lié aux variations de hauteur d'eau dans la retenue. Lors des hautes eaux, les sables se déposent à l'entrée de la retenue et sur une surface importante. Lors de l'abaissement du niveau d'eau (production d'électricité, irrigations,...), les crues suivantes entaillent les matériaux précédents et les déplacent vers le centre de la retenue.

6.6.2 Estimation du flux moyen annuel de M.E.S. sur la dernière décennie

A partir de la topographie de la zone du barrage avant sa mise en eau, il a été possible de calculer le volume d'eau susceptible d'être stocké entre la cote 240 m et une cote quelconque dans le secteur amont de la retenue (Tab. VI.6).

Les observations réalisées en hélicoptère lors de la campagne de juillet 1995 ont permis de localiser la limite de recul de l'eau dans le barrage (voir la planche II et la carte la figure III.6). Connaissant la surface inondée perdue, la topographie initiale et la topographie actuelle, il est possible de calculer le volume utile perdu en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue. Les volumes d'eau perdus correspondent ainsi à la quantité de sédiments accumulés entre 1983 et 1995. Le volume utile du barrage se définit entre les cotes 240 m et 270 m, niveaux minimum et maximum pour la gestion hydroélectrique.

Ainsi, pour 267 m, côte moyenne de l'eau dans la retenue, la perte de volume utile est de l'ordre de 31 millions de mètres cubes soient environ 46.3 millions de tonnes, pour une densité apparente de 1,5. Sur les 12 ans la moyenne est de 3,9 millions de tonnes par an accumulés dans la retenue en dessous de la cote 267 m représentant ainsi 2,43% du volume total du barrage. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle estimée avant la mise en eau du barrage, soient 5 millions de tonne.an⁻¹ (chapitre II, § 2.4.7). Malheureusement, aucune indication n'est fournie sur la méthode retenue pour cette estimation.

L'érosion calculée précédemment, 31 millions de m³, représente un abaissement moyen des profils pédologiques de 20,1 mm en 12 an sur les 1 540 km² du bassin, soient 1,7 mm.an⁻¹, ce qui est considérable. Ceci représente aussi 2,5 10³ tonne.km⁻².an⁻¹ et 22% du volume du barrage. Ce résultat doit être comparé à l'érosion spécifique sur le secteur Vitisay, estimée à 0,88 10³ tonne.km⁻², estimée sur une seule crue moyenne. Les seules estimation disponibles (M.A.R.N.R., 1990) sont 3,22 10³ tonne.km⁻².an⁻¹ pour l'ensemble du bassin entre 1968 et 1973 et 1,40 10³ tonne.km⁻².an⁻¹ pour la branche Boconó en amont de la ville de Boconó durant la même période.

Ces résultats montrent que les estimations réalisées dans cette étude (2,5 10³ tonne.km⁻².an⁻¹) sont très proches des valeurs moyennes mesurées (3,22 10³ tonne.km⁻².an⁻¹) sur plusieurs années avec un pas de temps assez lâche.

Tableau VI.6.

Estimation du volume de sédiment accumulé dans l'entrée du barrage entre le début de la mise en eau et juillet 1995.

Les volumes indiqués sont ceux compris entre la côte considérée et la cote 240 m.

Cote (m)	Volume utile d'eau initial dans l'entrée du barrage (m3)	Volume utile d'eau final dans l'entrée du barrage (m3)	Volume de sédiment (m ³)
240	0	0	0
245	3,93 10 ⁶	3,93 10 ⁶	0
250	15,72 10 ⁶	15,72 10 ⁶	0
260	62,88 10 ⁶	55,72 10 ⁶	7,16 10 ⁶
267	114,60 10⁶	83,72 10⁶	30,88 10⁶
270	141,00 10 ⁶	95,72 10 ⁶	45,28 10 ⁶

Cependant, il convient de remarquer que cette valeur ne prend pas en compte des sédiments accumulés à l'entrée du barrage dans les zones inondables entre 267 et 280 m et qui ont été charriés par la rivière. Ces matériaux sont susceptibles d'être repris par les crues à venir, en particulier lors des hautes eaux du barrage, et peuvent s'accumuler dans le volume utile de la retenue.

Ainsi, en dessous de 270 m, le tonnage de sédiments accumulés est de 63.4 millions de tonnes en 12 ans.

Il est probable que le tonnage moyen annuel de M.E.S. transportées ces dix dernières années est voisin de 6 à 7 millions de tonnes. Cependant, pendant, ces 12 années, aucune crue

exceptionnelle n'a eu lieu; aussi, sur un plus long terme, il est probable que cette moyenne doive être revue à la hausse.

6.6.3 Etude des profils granulométriques des sédiments du barrage et comparaison avec la granulométrie des affluents du río Boconó.

En juillet 1995, une campagne de prélèvements des sédiments du barrage a été réalisée en différents points. A l'aide d'une tarière, des échantillons ont été extraits depuis la surface jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 10 m. La granulométrie des fractions grossières a été réalisée en laboratoire selon le même protocole que pour les sédiments transportés par les crues de 1994 et 1995.

La localisation des point des prélèvements se trouve sur la figure III.6.

L'observation des profils dans la partie récemment colmatée de la retenue, montre qu'ils sont systématiquement constitués d'alternances de couches de sables très grossiers, de couleur grise et constitué de micas, feldspaths et quartz, et de couches noires relativement riches en carbone organique particulaire et constituées de sables plus fins. Ces couches ont des épaisseur variables entre 70 et 120 cm pour les secondes et 1 m à 2 m pour les premières.

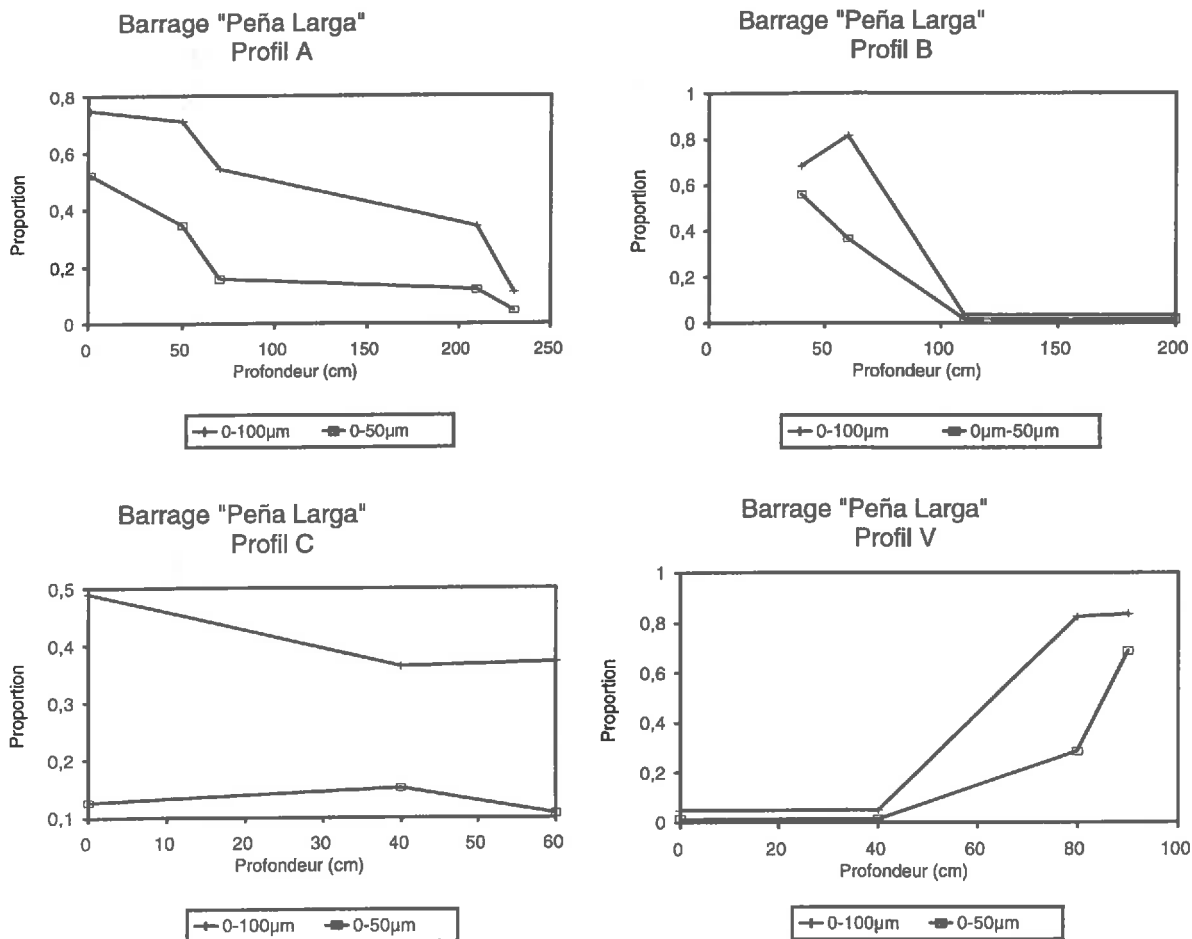


Figure VI.36 : Variations verticales des fractions granulométriques 0-50 µm et 50-100 µm pour différents profils de sédiments prélevés dans le retenue de Peña Larga.

Ainsi, les matériaux n'arrivent pas mélangés à la retenue. En revanche, la reprise par l'érosion des crues suivantes des matériaux déposés précédemment peut conduire à un mélange des différentes couches.

La granulométrie générale des sédiments est relativement grossière (Fig.VI.36). Les fractions de diamètre supérieur à 100 µm sont nettement plus abondantes dans ces profils que dans les MES des crues étudiées en 1994 et 1995. Ceci peut s'expliquer de plusieurs manières:

- les conditions réductrices de ce milieu engorgé et chaud conduit à la solubilisation des matériaux ferriques, et notamment des plus fins. L'activité biologique consomme aussi le Carbone Organique Particulaire (C.O.P.) qui se cantonne dans les fractions les plus fines.
- la contribution importante des zones situées en aval de la confluence Boconó/Burate et qui fourniraient des sables grossiers.
- la reprise des sédiments déposés à l'entrée de la retenue, avec tri granulométrique qui conduit au dépôt des fractions grossières en amont et au transport jusqu'au centre du barrage des particules fines.
- un tri granulométrique dans la retenue lors des crues.

6.6.5 Conclusion sur l'étude des sédiments du barrage

Cette étude des sédiments accumulés dans l'entrée de la retenue est sommaire. Cependant, elle permet de confirmer des ordres de grandeurs de quantités de M.E.S. exportés.

La nature des sédiments et leur granulométrie ont été subit des modifications importantes. En effet, de processus de réduction notoires ont été observés sur le terrain et qui ont fait aussi l'objet d'une étude plus détaillée dans le chapitre IV. Malgré cette évolution après le dépôt, les observations montrent des séries superposées sur plusieurs couches de sédiments grossiers et micacés et de matériaux plus fins et colorés par du C.O.P. vraisemblablement fossile. Cette succession rappelle les conclusions sur des vitesses de transfert et des granulométries différentes selon l'origine géographique des flux. Cette présence de matériaux plus fins et riches en C.O.P. qui proviennent pour partie des zones lutitiques du Guaramacal, tant à l'amont de la confluence Boconó/Burate que dans le massif même du Guaramacal, montre l'importance du suivi de ces matériaux. Ce paragraphe clôture l'étude des mécanismes de transferts qui ont montré la forte hétérogénéité spatiale dans l'origine de l'eau, des éléments dissous et des M.E.S. Le paragraphe suivant va tenter de reprendre cette connaissance spatiale des bassins amont et des mécanismes pour réaliser une simulation de la crue du 9-10 juillet 1995 dans les deux branches amont du bassin.

6.7 Simulation des transferts d'eau et de soluté dans les bassins versants des Río Burate et Boconó: cas de la crue du 9-10 juillet 1995.

La simulation des transferts d'eau et de soluté a été réalisée en deux temps. Le bassin versant a été tout d'abord découpé en trois sous bassins. Afin d'affiner l'analyse, la simulation a été reprise en prenant en compte quatre zones d'alimentation.

Lors de la crue du 9-10 juillet 1995, l'hydrogramme de sortie du bassin versant de Corojo a été considéré comme représentatif des bassins versants élémentaires situés sur les versants. Il constitue le signal d'entrée dans le réseau hydrographique, c'est à dire la condition limite supérieure pour la résolution de l'équation différentielle de convection/dispersion. Les volumes sont pondérés par la pluviométrie totale tombée sur chaque sous-bassins. La modélisation consiste en propager les ondes issues de chaque sous bassins jusqu'à l'exutoire du bassin considéré, en l'occurrence la confluence Bocono/Burate.

Les données nécessaires sont les suivantes:

- * le nombre de sous-bassins
- * pour chaque sous bassin:
 - la pluviométrie totale du sous bassin, produit de la pluviométrie moyenne par sa surface.
 - la longueur du bief séparant l'exutoire du sous bassin de l'exutoire du bassin
 - la célérité et la dispersivité de la propagation dans ce bief

- la signature chimique moyenne à l'exutoire du sous bassin versant

En sortie, le modèle indique les hydrogrammes élémentaires de chaque sous bassin propagés jusqu'à l'exutoire du bassin versant, ainsi que l'hydrogramme général et le chimiogramme en ce point .

6.7.1 Simulation des transferts d'eau et de solutés du río Burate à trois pôles géographiques

Une simulation a été réalisée avec trois pôles géographiques: le secteur Vitisay, le bassin versant de Tomón et le haut Burate représenté essentiellement par la Coneja. Le temps de transfert de chaque contribution est égal au produit de la longueur du bief par la vitesse de transfert dans le bief. Les valeurs retenues sont issues des documents cartographiques et des observations réalisées sur le terrain.

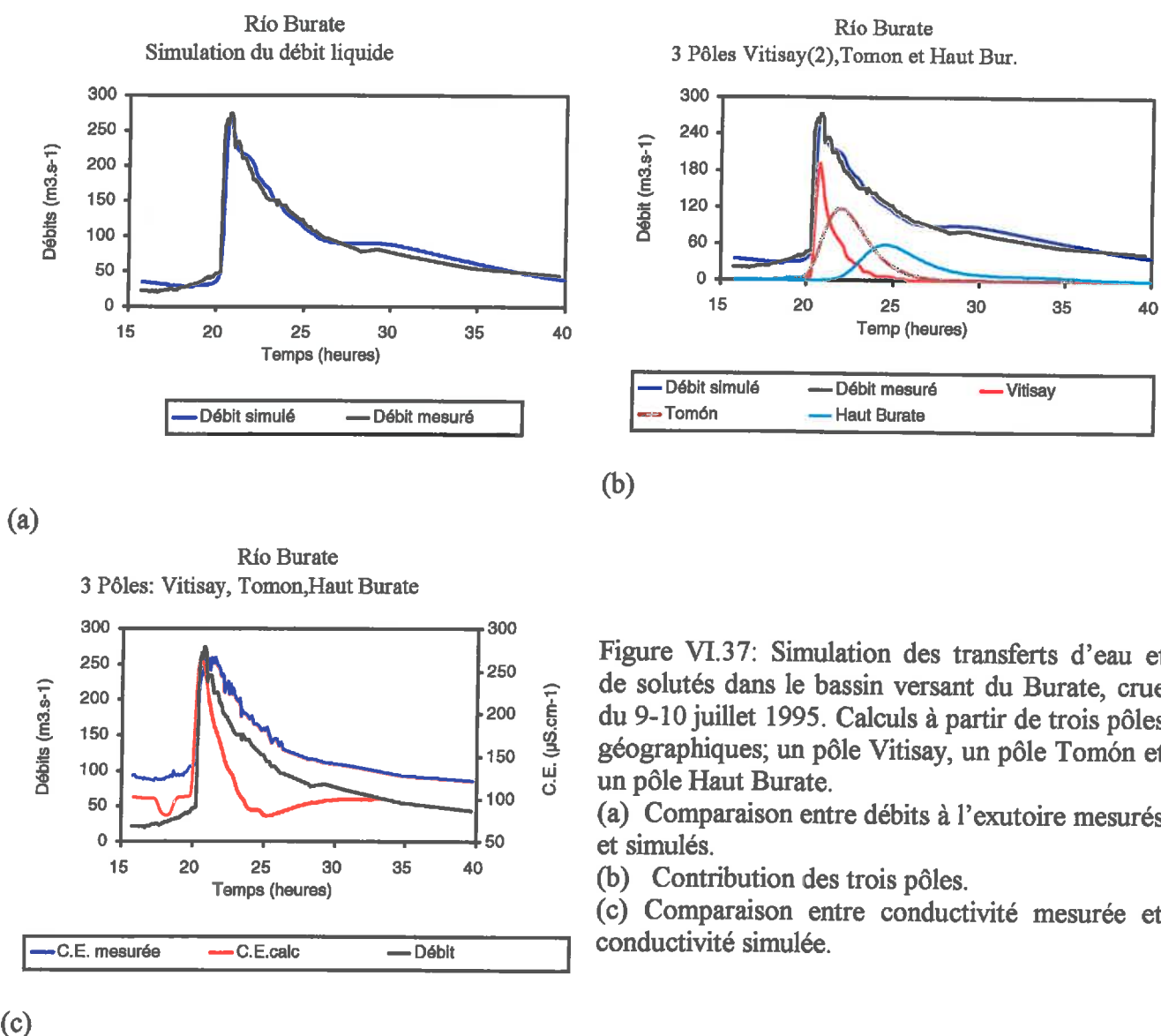


Figure VI.37: Simulation des transferts d'eau et de solutés dans le bassin versant du Burate, crue du 9-10 juillet 1995. Calculs à partir de trois pôles géographiques; un pôle Vitisay, un pôle Tomón et un pôle Haut Burate.

(a) Comparaison entre débits à l'exutoire mesurés et simulés.

(b) Contribution des trois pôles.

(c) Comparaison entre conductivité mesurée et conductivité simulée.

Les résultats obtenus (fig. VI.37) montrent un assez bon accord entre l'hydrogramme calculé et l'hydrogramme mesuré. La première vague atteignant l'exutoire est celle provenant du secteur Vitisay puis celle de Tomón et enfin celle du haut Burate qui arrive en dernier. De manière qualitative, les variations simulées de la conductivité électrique ressemblent à celles mesurées. Cependant, la décroissance de ce paramètre lors dès le début de la décrue est assez

mal rendue, ce qui induit des écarts notables entre simulation et mesures. Le modèle prévoit une diminution plus rapide que celle qui a été observée. Ceci montre une sous-estimation de la contribution du secteur Vitisay lors de cette phase de la crue ainsi qu'une arrivée trop précoce des eaux de la quebrada Tomón.

Il convient donc de prendre en compte un écoulement plus tardif provenant du secteur Vitisay et de mieux intégrer les caractéristiques de transferts de la quebrada Tomón.

6.7.2 Simulation des transferts d'eau et de solutés du río Burate à quatre pôles géographiques

La simulation a été réalisée avec 4 sous bassins versants (Fig. VI.38). Deux bassins du secteur Vitisay débouchant dans le Burate à des distances différentes de l'exutoire, le sous bassin de Tomón et le Haut Burate comprenant essentiellement la Coneja (Tab.VI.7).

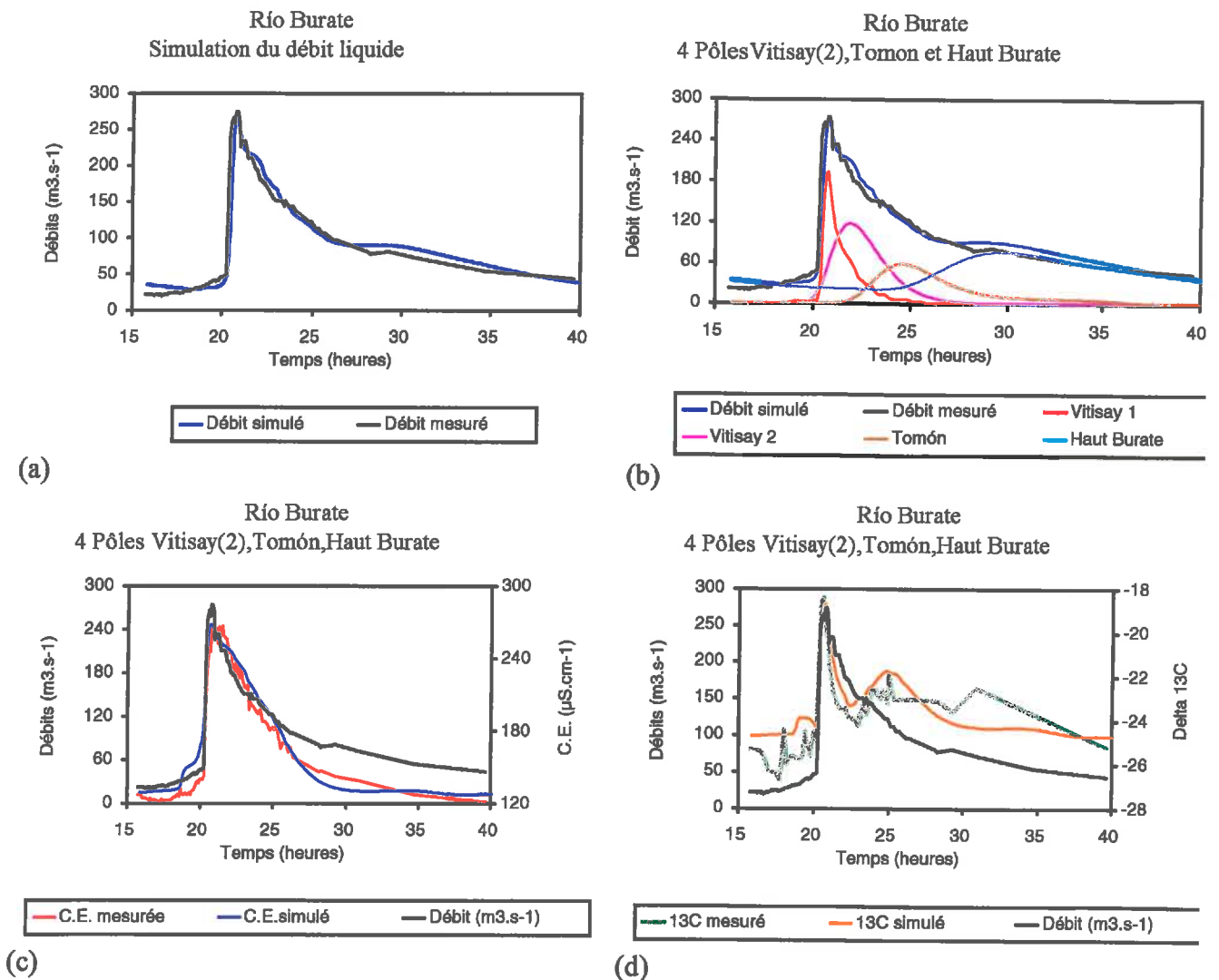


Figure VI.38: Simulation des transferts d'eau et de solutés dans le bassin versant du Burate (crue du 9-10 juillet 1995). Calculs à partir de quatre pôles géographiques; 2 pôles Vitisay, un pôle Tomón et un pôle Haut Burate (Coneja).

- (a): Comparaison entre débits à l'exutoire mesurés et simulés
- (b) Contribution des différents sous bassins
- (c) Comparaison entre conductivité mesurée et simulée.
- (d) Comparaison entre $\delta^{13}C$ mesuré et simulé.

L'accord avec les résultats expérimentaux est nettement meilleur que pour la simulation à trois pôles géographiques, aussi bien pour les transferts d'eau que pour le soluté. Pour ce dernier paramètre l'amélioration est particulièrement marquée, ce qui montre que la simulation des transferts de soluté est plus sensible aux hypothèses concernant la structure hydrologique que ne l'est la simulation des transferts d'eau.

Tableau VI.7:

Paramètres retenus pour la simulation des transferts d'eau et de solutés dans le río Burate avec quatre pôles géographiques.

Sous bassin	Contribution	Signature $\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB.)	Signature CE (μS)	Longueur du bief (km)	Célérité ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Dispersivité ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
Vitisay 1 (Secteur Vitichaz)	16,9	-16,0	290	8,30	1,5	70
Vitisay 2	25,3	-26,0	250	13,00	1,5	450
Tomón	21,7	-19,0	190	20,00	1,8	550
Haut Burate (Secteur Coneja)	36,1	-25,0	120	36,00	2,0	2900

6.7.3 Etude de la sensibilité du modèle de transferts d'eau et de soluté

Afin de tester la sensibilité du modèle aux paramètres morphologiques du réseau hydrographique, de nouvelles valeurs, différentes des premières ont été utilisées. Celles-ci figurent dans le tableau VI.8. Les autres paramètres, tels que signature chimique des pôles, vitesse de l'eau ou coefficient de dispersion n'ont pas été changés.

Par rapport à la simulation de référence, les longueurs de bief ont été modifiées de 10% de leur longueur initiale, ce qui est faible. Les distances des biefs correspondants aux sous bassins les plus proches (Vitisay1 et Vitisay 2) ont été allongées. Les autres ont été raccourcies. Les contributions des différents sous-bassins ont été modifiées dans les mêmes proportions, à savoir 10% du volume total, avec une réduction pour les bassins Vitisay et une augmentation pour les bassins situés plus en amont.

Tableau VI.8:

Valeurs caractéristiques du réseau hydrographique utilisées pour tester la sensibilité du modèle.

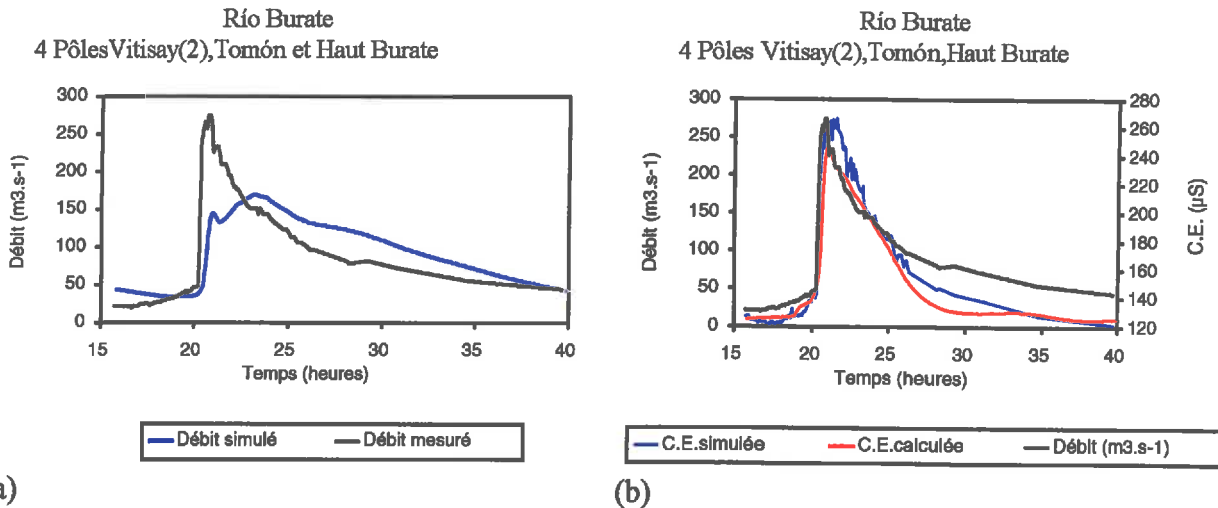
Sous bassin	Ancienne valeur de la Contribution (%)	Nouvelle valeur de la Contribution (%)	Nouvelle longueur du bief (m)	Ancienne longueur du bief (m)
Vitisay 1 (Secteur Vitichaz)	16,9	7,2	9 130	8 300
Vitisay 2	25,3	15,7	14 300	13 000
Tomón	21,7	31,3	18 000	20 000
Haut Burate (Secteur Coneja)	36,1	45,8	32 400	36 000

Les résultats (fig.VI.39a et b) montrent que le modèle est très sensible aux caractéristiques morphologiques du réseau. Ces modifications de 10% des paramètres de longueur essentiellement, conduisent à un hydrogramme simulé très loin de la réalité de terrain

(fig. VI.39a). Ceci montre qu'il est impossible d'ajuster le modèle si l'on ne dispose pas des données de longueur de bief.

Pour le bassin versant du Burate, la sensibilité du modèle pour la simulation des transferts de soluté est assez forte (fig.VI.38 b), mais semble moins importante que pour les transferts d'eau.

Ceci montre l'importance de la connaissance précise des pôles. Par ailleurs, dans la mesure ou l'erreur sur les transferts d'eau ne conduit pas à une inversion de l'ordre d'arrivée des flux issus des différents sous bassins, il ne peut y avoir d'inversion complète du chimiogramme.



(a)

(b)

Figure VI.39: Résultats de simulation des transferts d'eau et de soluté pour de fausses caractéristiques morphologiques du réseau hydrographique; Simulations de l'hydrogramme (a) et du chimiogramme (b).

6.7.4 Synthèse et conclusion sur la simulation des transferts d'eau, de solutés et de matières particulières dans le Burate.

L'étude de sensibilité du modèle a montré que les résultats sont fortement dépendant de la longueur des différents biefs. Ainsi, dès que les valeurs indiquées s'écartent sensiblement des longueurs mesurées sur les cartes, il est impossible d'obtenir un bon accord entre simulation et mesures de terrain, à moins d'introduire des célérités aberrantes.

Par ailleurs, il convient de remarquer que lorsque l'on introduit les longueurs de bief mesurées sur les cartes dans le modèle, les célérités obtenues par ajustement sont très proches des mesures réalisées sur le terrain; elle diminuent de l'amont du Burate vers l'aval, au même titre que la pente de la rivière. Ce résultat traduit le fait que la vitesse de l'eau, excessivement rapide dans le secteur pentu de l'amont ralentit quelque peu vers l'aval, lorsque les pentes sont moins marquées.

Les vitesses obtenues varient peu et entrent parfaitement dans la gamme des vitesses mesurées dans le réseau. Ainsi, dans le río Boconó, les mesures de vitesses moyennes de la section réalisées à la station de Las Cavitas, qui constitue un rétrécissement, varient de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ pour les étiages ($7,45 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) à $2,59 \text{ m.s}^{-1}$ pour une petite crue de $104 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (M.A.R.N.R., 1995).

Le coefficient de dispersion évolue dans le même sens, faible dans le bief aval, pour de courtes distances de transfert, il augmente avec la célérité et la pente. Ces trois paramètres, pente, célérité et dispersivité, augmentent avec le caractère torrentiel.

En résumé, l'assez bon accord entre les résultats de la simulation et les mesures expérimentales ainsi que la forte sensibilité du modèle aux données de structure du réseau hydrographique montrent que l'arrivée d'une eau concentrée provenant du secteur Vitisay puis

d'eau provenant des secteurs Tomón et enfin du Haut Burate expliquent l'essentiel des variations de conductivité électrique et de débit. La pente des biefs successifs du Burate semble déterminer les différentes propriétés de transferts d'eau et de soluté, à savoir la célérité et la dispersivité. Dans une étude ultérieure, il pourrait être intéressant de caler ces deux paramètres sur la pente, donnée facilement accessible à partir de documents cartographiques.

6.7.5 Simulation de la crue du Boconó avec quatre pôles géographiques

Comme pour le Burate, la crue des 9 et 10 juillet 1995 a servie de base à la modélisation. Les paramètres morphologiques utilisés figurent dans le tableau VI.9.

Tableau VI.9:
Paramètres retenus pour la simulation de la crue du Boconó avec quatre pôles géographiques.

Secteur	Longueur du bief (km)	Célérité ($m.s^{-1}$)	Dispersion ($m^2.s^{-1}$)	Contribution (%)	C.E. (μS)
Chandá-Corojó	3,7	0,9	400	05,2	200
Segovia-Cafenol	10,0	1,5	400	15,6	170
Toro-Río Blanco	21,0	1,5	330	41,7	70
Haute vallée R.Negro	42,0	1,6	3 000	37,5	85

Pour l'essentiel, les résultats de la simulation (fig. VI.40), sont conformes aux mesures de débits et de conductivité. Ils confirment que l'alimentation des secteurs aval est minime contrairement au cas du Burate. L'essentiel des débits proviennent des zones moyennes et hautes du bassin, plus humides, qui sont aussi les voies de pénétration des masses nuageuses.

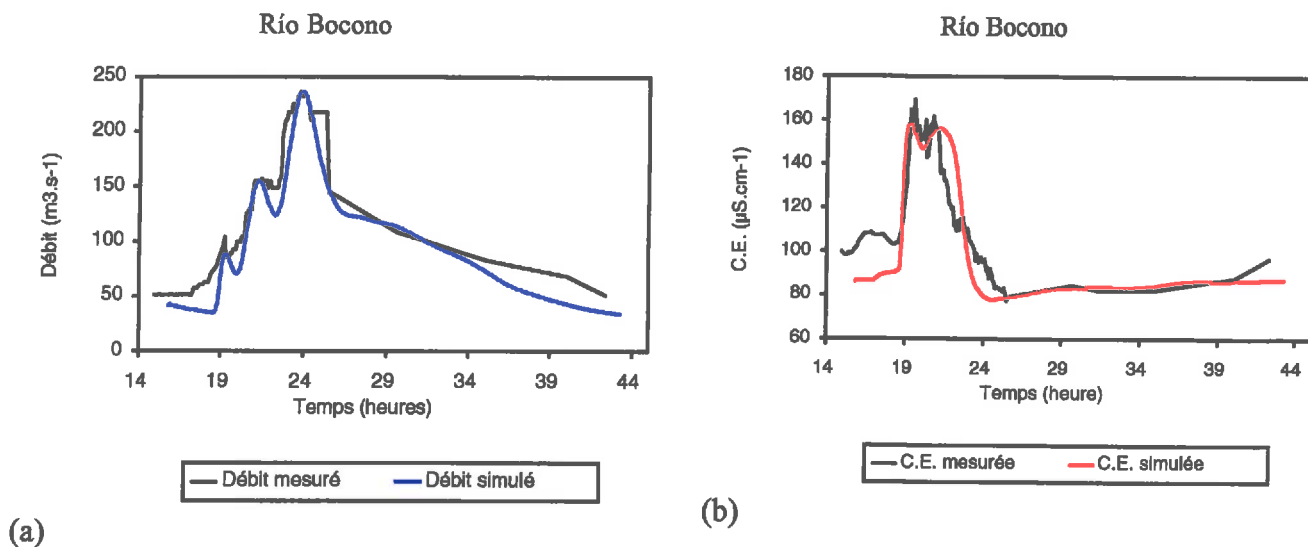


Figure VI.40 : Comparaison entre valeurs simulées et valeurs mesurées pour les débits (a) et la conductivité électrique (b) pour la branche Boconó lors de la crue du 9 au 10 juillet 1995.

En revanche, la description précise du réseau hydrographique est plus difficile que pour le cas du Burate, car dans le bassin de Boconó, chaque secteur correspond à un certain nombre d'affluents qui débouchent de façon étalée le long de Boconó. Les valeurs retenues et présentées dans le tableau VI.8 sont des valeurs moyennes entre les extrêmes indiqués. Ceci

rend la valeur de célérité assez imprécise. Cependant, dans l'ensemble, les célérités sont plus faibles que pour le Burate, ce qui est conforme à la différence de pente et de structure entre Boconó et Burate.

Pour cette simulation, aucun échange entre l'éventuelle nappe alluviale et la rivière n'a été pris en compte. L'assez bonne concordance entre mesure et simulation suggère que ce phénomène est secondaire en égard à la rapidité et soudaineté des événements principaux.

Comme pour le Burate, les célérités obtenues augmentent avec la pente. Cependant, elles sont moins importantes que pour le Burate, ce qui est conforme aux données hypsométriques qui indiquent des pentes plus fortes pour le Burate que pour Boconó.

6.7.6 Conclusion sur la modélisation des transports d'eau, de solutés et de matières en suspension dans les branches principales du réseau hydrographique.

Grâce au modèle d'hydrologie de surface, il a été possible de montrer que les mécanismes de transferts déduits de l'étude des variations temporelles des paramètres physico-chimiques permet d'expliquer l'essentiel des variations de débit et des caractéristiques chimiques de l'eau et des M.E.S. Ce résultat suggère que les mécanismes omis sont d'un second ordre.

Par rapport aux modélisations purement hydrologiques qui ne prennent en compte que les débits liquides, la simulation des chimiogrammes de la phase aqueuse et des phases particulières constitue autant de niveaux supplémentaires de validation du modèle.

La modélisation a permis de montrer l'importance des données de structure du réseau pour la simulation correcte des débits d'eau, d'éléments dissous et particuliers. Il est impossible de caler le modèle avec des paramètres raisonnables si la morphologie du réseau est incorrecte.

Les calculs réalisés ont montré la relation étroite qui lie les paramètres hydrodynamiques de célérité et dispersivité à la pente. Ceci permet d'envisager pour un bassin torrentiel donné, la possibilité d'un calage fiable des vitesses à partir des données hypsométriques qui sont facilement accessibles.

6.8 Conclusion du chapitre.

Les variations temporelles importantes des caractéristiques physico-chimiques des eaux observées aux différentes échelles permettent un traçage

Depuis les plus petits bassins situés sur les versants de la partie montagnarde, jusqu'à l'exutoire de l'ensemble du bassin du Río Boconó, les signaux physico-chimiques sont particulièrement marquée et permettent d'étudier tout au moins qualitativement les transferts d'eau par traçage naturel. Le caractère torrentiel, responsable d'une forte turbulence et donc d'une forte homogénéisation de l'eau au sein de la section, ne conduit pas pour autant une atténuation des signaux, un aplatissement des chimiogramme, bien au contraire. La variabilité spatialement structurée des pentes et de la morphologie des réseaux hydrographiques des sous bassins conduit à une disparité importante des vitesses de transfert d'eau. Au niveau des confluences principales comme secondaires, les crues de chaque affluent arrivent séparément, l'une après l'autre, ce qui ne permet pas de mélange d'eau en proportions constantes. Au contraire, du fait de l'hétérogénéité des temps de transferts, les proportions d'eaux issues des affluents varient de manière importante, induisant des fortes variations des caractéristiques physico-chimiques qui se propagent ensuite vers l'aval.

Stabilité remarquable de la typologie des traceurs et marqueurs

Les études réalisées sur les différents sous-bassins versants du Río Boconó, ont révélés une typologie relativement stable des paramètres chimiques pouvant être utilisés comme traceurs ou marqueurs. Lors des changements d'échelle successifs, les groupes de

marqueurs et leur signification ont peu variés. Ainsi, le chlorure, la température et l'oxygène 18 sont très corrélés, véhiculant une même information. Il en est de même pour la conductivité électrique et la teneur en sulfate. Le potassium et le taux de MES sont eux-mêmes bien corrélés, conformément à de nombreux résultats de la littérature.

Lorsque la pCO₂ équilibrante a pu être estimée à partir de la mesure de pH in situ, ce paramètre est curieusement avéré utile malgré le brassage important de ces torrents. Les informations sur l'origine des eaux issues de milieux riches ou au contraire pauvres en CO₂ n'ont pas été totalement perdues lors des transferts dans les torrents.

Stabilité de certains mécanismes de transfert; variabilité spatiale de la pluviométrie et de la susceptibilité des sols à l'érosion.

Ce chapitre clôturera la démarche de changement d'échelle entreprise au début du chapitre V. Certains mécanismes ont été mis en évidence depuis le petit bassin des Jarillos situé sur un versant de l'amont, jusqu'à l'ensemble du bassin. La succession d'eaux légèrement concentrées et sulfatées issues des zones sédimentaires puis d'eaux diluées alcalines provenant des zones hautes du paysage été remarquablement constante pour toutes les crues étudiées.

La décomposition des hydrogrammes a permis de calculer les contributions des différents sous bassins. Il apparaît ainsi, que le bilan des exportations, tant dissoutes que particulaires, réalisé sur les branches principales cache de très fortes disparités entre les secteurs du bassin versant. Ainsi, les zones sédimentaires lutitiques semblent contribuer de façon prédominante à la fourniture de matériaux solides et dissous. Les zones d'altération des roches cristallines en revanche semblent mieux résister à l'altération. Les calculs d'exportations spécifiques réalisés sur ces matériaux semblent assez constant à pluviométrie comparable, ce qui permettra d'affiner les prévisions des quantités exportées.

CONCLUSIONS GENERALES

L'introduction de ce document fait emphase sur l'importance des échanges fluviaux des continents vers l'océan, sur la considérable contribution prise par la zone tropicale et pour l'Amérique du sud, le fait que la chaîne andine fournit l'essentiel des matériaux dissous et particulaire aux bassins versants des grands fleuves. Aussi, ce travail a tenté d'apporter une contribution à la connaissance des flux d'eau, d'éléments dissous et surtout particuliers (minéral et organique) depuis les Andes vénézuéliennes vers la plaine des *Llanos* et de leurs mécanismes générateurs.

Dans ce milieu, mal connu jusqu'à présent, il a fallu tout d'abord acquérir les informations de base. Dans un second temps, l'accent a été mis sur le développement des méthodes adaptées au milieu torrentiel et à cette taille de bassin. Compte tenu de l'absence d'équipement hydrologique important dans les points principaux du bassin, le traçage naturel est apparu d'emblée comme un outil privilégié de l'étude de l'origine des flux d'eau et d'éléments chimiques. La complexité du milieu a alors requis une gamme étendue de marqueurs et traceurs qui ont été suivis pour tous les sous bassins dans une démarche de changement d'échelle.

Dans un premier temps, diverses campagnes de prélèvements ont permis de préciser la géographie des caractéristiques physico-chimiques des eaux de sol et de torrents. Il a été possible de définir les grandes unités paysagiques et leur signature chimique et isotopique. Pour chacune des unités un travail de modélisation a permis de mieux comprendre les mécanismes d'acquisition de ces signatures, tant au niveau chimique qu'isotopique. Malgré une certaine variabilité, les signatures observées présentent une stabilité saisonnière notable, ce qui permet une utilisation assez générale des résultats acquis dans ce domaine.

Dans un second temps, les mécanismes de transferts d'eau, d'éléments dissous et particuliers ont été étudiés de façon qualitative au niveau de versants à l'occasion de crues. Le traçage naturel a été alors utilisé, faisant appel à la connaissance des signatures acquises précédemment. La quantification des flux a été réalisée sur les branches principales du bassin. Les méthodes de décomposition des hydrogrammes ont permis de préciser les contributions de chaque sous bassin principal au bilan global de l'exportation à l'échelle d'une crue. Le couplage entre un modèle d'hydrologie de surface et les équations de conservation de masse de solutés ou de M.E.S. a permis de simuler les transferts dans les deux branches principales du secteur amont. Il a été possible ainsi de vérifier que les mécanismes suggérés par le traçage expliquaient l'essentiel des variations de débit et teneurs en éléments dissous ou particuliers observées.

Les résultats acquis sont de trois ordres. Il portent sur la caractérisation du milieu en terme de connaissance et de quantification des flux, sur la méthodologie en particulier par la détermination des traceurs et marqueurs les plus intéressants et enfin sur les mécanismes de transferts dans ce milieu montagnard et tropical.

Caractérisation du milieu:

Le milieu étudié présente une hétérogénéité spatiale très forte et bien structurée. Les zones amont sont constituées de roches cristallines. Les eaux d'altération sont alcalines et d'autant plus diluées qu'elles proviennent des zones hautes et froides. La végétation d'altitude et surtout de la forêt sempervirente fourni une source de carbone organique frais facilement identifiable par sa signature isotopique.

Les zones sédimentaires, surtout localisées dans les altitudes intermédiaires et basses, induisent une minéralisation des eaux plus importante. La présence de lutite pyriteuse provoque un apport conséquent de sulfate et de C.O.P. fossile. L'acidité parfois extrême produite par l'oxydation des pyrites induit des phénomènes de phyto-toxicité qui privent les sols de la végétation protectrice. La forte sensibilité de ces matériaux à l'érosion en fait un lieu privilégié de départ de M.E.S. riche en C.O.P. fossile. Il en résulte une forte contribution du C.O.P. fossile dans le flux de C.O.P. des rivières.

Dans le barrage, l'accumulation de sédiments dans des conditions d'engorgement par l'eau et de température élevées provoque une forte réduction des sédiments. Le carbone organique est en grande partie oxydé et les sédiments sont altérés par dissolution en milieu réducteur.

Au niveau isotopique, le $\delta^{18}\text{O}$ des pluies présente un gradient altitudinal classique de 0,3‰ pour 100 m de dénivelée, mais sa distribution spatiale montre deux zones de pénétration des masses nuageuses sur le bassin, chacune ayant au départ sa propre signature. Ainsi, le gradient altitudinal s'exprime selon deux relations distinctes, une par masse nuageuse.

La distribution du carbone organique est plus hétérogène. Les signatures isotopiques permettent aisément de différencier les zones de culture de maïs qui se cantonnent habituellement aux altitudes basses et moyennes, des zones forestières ou des pelouses d'altitude.

Par ailleurs, cette étude a montré le lien très étroit qui existe entre la lithologie, la morphologie et la structure du réseau hydrologique.

Acquis méthodologiques:

Le traçage naturel s'est avéré efficace à toutes les échelles utilisées depuis le bassin versant des Jarillos (8 km²) jusqu'à celui de toute la partie andine du río Boconó (1 540 km²). Un grand nombre de paramètres a été utilisé. Un traitement statistique permet de les classer en groupes homogènes. Au sein de chaque groupe les informations sont fortement redondantes et la multiplicité des traceurs ou marqueurs constitue autant de vérifications. En revanche, les divers groupes véhiculent des informations complémentaires et non redondantes. Ainsi, il a été possible de distinguer les origines géographiques des eaux à partir des éléments majeurs et de la conductivité électrique, comme de la granulométrie des sédiments. La différenciation entre eau préexistante et eau nouvelle a été menée avec succès par la technique habituelle isotopique $\delta^{18}\text{O}$, mais aussi avec la température et les teneurs en chlorure et accessoirement en sodium. Enfin, des traceurs et marqueurs moins courants se sont avérés très efficaces. Il s'agit en particulier de la pCO₂ qui permet de distinguer les eaux des sols développés sur lutite, de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (A.R.C.) qui marque de façon spécifique les zones de production de l'acidité et des marqueurs de la matière organique ($\delta^{13}\text{C}$ et C/N) qui indiquent l'origine géographique mais permettent aussi une différenciation verticale de l'origine des M.E.S.

Le fait le plus remarquable est, lors des changements de bassin, d'échelle ou d'année d'observation; une stabilité de la typologie des traceurs et marqueurs, à quelques nuances près.

Par ailleurs, le recours à la modélisation thermodynamique et hydrologique s'est avéré particulièrement utile. Elle a permis de vérifier si les mécanismes suggérés par l'observation des données sont les plus importants ou s'ils sont secondaires. La modélisation permet en outre de quantifier les masses mises en jeu aussi bien en terme de flux propre à chaque secteur que pour les réactions chimiques d'altération.

Acquis sur la connaissance des mécanismes de transfert:

Les vitesses d'écoulement de l'eau aussi bien sur les versants que dans les branches principales du réseau sont très élevées. Elles sont corrélées à la pente mais aussi pour les bassins plus importants, à la structure du réseau hydrologique. Dans les milieux sédimentaires, avec

des structures en «arêtes de poisson», les trajets sont rectilignes, la vitesse de l'eau est très élevée et les temps de réaction sont particulièrement courts. Les taux de M.E.S. peuvent être très importants. En revanche, sur roches cristallines, avec des structures plus dendritiques, les axes principaux et secondaires sont moins rectilignes, ce qui induit des pentes plus faibles, des vitesses de l'eau moins élevées et des temps de réaction moins rapides. Les taux de M.E.S. sont moindres.

La forte variabilité spatiale des pentes induit une disparité des temps de réaction entre sous bassins. Ainsi, les eaux issues de chaque secteur parviennent successivement dans les points de confluence; elles ne peuvent se mélanger mais se succèdent au contraire. Ceci induit de fortes variabilités temporelles des caractéristiques chimiques des eaux, facteur propice au traçage naturel.

Pour chaque onde issue d'un secteur, les eaux proviennent tout d'abord de la surface. Elles induisent une érosion de surface qui attaque en premier lieu les litières forestières. Ensuite, les écoulements attaquent les horizons humiques des zones cultivées comme celles des forêts. Enfin les débits de pointe, particulièrement violents provoquent une érosion incisive qui attaque le lit des torrents et des rivières. Si le soubassement est purement minéral, le C.O.P. subit alors un effet de dilution par les M.E.S. minérales.

Les apports de la modélisation ont été importants ils ont permis de vérifier que les mécanismes décrits permettent d'expliquer l'essentiel des variations de flux d'eau, d'éléments dissous et particuliers. Ils permettent aussi d'estimer les exportations spécifiques pour chaque secteur. Les résultats font apparaître de fortes disparités selon la nature lithologique. L'hétérogénéité de la pluviométrie est elle-même responsable en partie de l'hétérogénéité des exportations sous forme de M.E.S. Ainsi, dans l'une des branches principales de la partie mont du bassin, les zones lutitiques reçoivent 4 fois plus d'eau mais exportent 10 fois plus de M.E.S. que les autres secteurs. Par conséquent, il convient de ne pas se limiter au calcul de valeurs moyennes, des zones de faible extension étant susceptibles de modifier l'exportation moyenne d'un bassin.

Ce travail soulève la question de la modification des flux de M.E.S. et notamment du C.O.P. dans l'hydrologie des grands fleuves d'Amérique du Sud. Les résultats de cette étude montrent comme la multiplication des barrages à la sortie du piémont andin du Venezuela prive, l'Apure affluent de l'Orénoque, de sa principale source d'apport de matériaux solides. Les flux de C.O.P. sont profondément altérés alors qu'ils jouent un rôle déterminant dans le développement de l'activité biologique des grands fleuves, notamment en zone amazonienne. Cette réduction du flux de C.O.P. mérite une étude plus globale par les spécialistes de ces échelles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ambroise, B., 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré. Processus et modèles. Annuaire du Conseil Scientifique du Département "Science du Sol" de l'INRA. Dijon, 26-27/03/91. 1-33 pp.
- Amiotte- Suchet, P., et Probst, J.L., 1993. Erosion chimique du bassin versant du Congo: Variabilité spatio-temporelle des flux de CO₂ consommé par altération de la croûte continentale. Edité par Olivry J.C. et Boulègue J., Actes du colloque PEGI INSU-CNRS-ORSTOM, Paris. 51-68 pp.
- Andrieux, P., Bouzigues, R., Joseph, C., Voltz, M., Lagacherie Ph., et Bourlet. M., 1993. Le bassin versant de Roujan, caractéristiques générales du milieu, Documents internes de l'INRA, édité par l'INRA, Station de Science du Sol, Montpellier, France.
- Ashida, K., et Bayazit M., 1973. Initiation of motion and roughness of flows in steep chanel. Procc. 15th IAHR. Congress, Istambul, Turkey.
- Auque, L., 1993. Estudio de sistemas geotermales en Aragón: Pautas de especiación y reacción aplicadas a la modelización de sistemas de baja-media entalpía. Tesis de doctorado. Universidad de Zaragoza. España. 487 pp.
- Barbiéro, L., 1995. Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger. Origines d'alcalisation et évolution des sols sous irrigation. Th. Doc. Sci.. Ecole Nationale Supérieur Agronomique de Rennes. 212 pp.
- Bathurst, J.C., 1987. Bed load discharge equations for steep mountain rivers. Sediment transport in gravel bed rivers. Eds. Thorne, Bathurst et Hey, Wiley J. and Sons.
- Bathurst, J.C., et al 1983. Resistance equation for large-scale roughness. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, 107:12. 1593-1613 pp.
- Balesdent, J., 1993. Site-related $\delta^{13}\text{C}$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. Ecology, 74:6. 1713-1721 pp.
- Barnes C.J., et Allison G.B., 1988 - Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. J. Hydrol., 100. 143-176 pp.
- Bariac., T., Millet A., Ladouche B., Mathieu R., Grimaldi C., Grimaldi M., Sarrazin M., Hubert P., Molicova H., Bruckler L., Bertuzzi P., Bes B., Gaudu J.C., Horoyan, J., Boulègue J., Jung F., Bonnell M., Balek J., Brunet Y., Bonnefond J.M., Tournebize R. et Granier A., 1993. Décomposition géochimique des hydrogrammes de crue (bassins versants de la piste Saint-Elie, Guyane). Edité par Olivry J.C. et Boulègue J., Actes du colloque PEGI INSU-CNRS-ORSTOM. Paris. 485-505 pp.
- Bazemore., D.E., Eshleman., K.N. et Hollenbeck., K.J., 1994. The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence, J. Hydrol., 162, 47-75.

- Blavoux, B., 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l' ^{18}O et du ^3H . Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée, Th. Doc. Sci., Univ. of Pierre and Marie Curie, Paris, France, 333 pp.
- Bois, P., et Koulinski, V., 1994. Etude de la formation d'un lit torrentiel : Dune à forte pente et pavage, in Effets des crues sur le lit des torrents. Colloque Transports solides. Société Hydrotechnique de France. La houille Blanche n° 3, pp. 57-70.
- Bras, R.L., et Rodríguez-Iturbe, I., 1989. A review of the search for a quantitative link between hydrologic response and fluvial geomorphology. New directions for surface water modeling. Proc. Baltim. Symp., IAHS Publ. 181. 149-163 pp.
- Briand, P., Scribe, C., Pepe, A., Saliot, A., Mariotti, A., et Bruchet, A., 1993. Transfert de la matière organique des sols aux matières en suspension: caractérisation et évolution en fonction de la pédologie des petits bassins versants au nord de Manaus (Brésil). Edité par Olivry J.C. et Boulègue J., Actes du colloque PEGI INSU-CNRS-ORSTOM, Paris. 425-436 pp.
- Carrillo, F. 1985. Obtención del promedio anual del acarreo de sedimentos por la correlación de gastos líquidos con gastos sólidos en la cuenca alta del río Boconó. Trabajo de pasantía de la Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de los Andes.
- Censier, C., 1993. Dynamique sédimentaire de la charge de fond sableuse du cours moyen et inférieur de la Sangha (République du Congo). Edité par Olivry J.C. et Boulègue J., Grands bassins fluviaux. Actes du colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM. Paris, France. 22 au 24 Novembre. 229-238.
- Censier, C., et Olivry, J.C., Distribution de la granulométrie et de la minéralogie de la charge de fond sableuse du bassin de l'Oubangui (R.C.A.): implications sur l'origine et la dynamique sédimentaire des alluvions de l'Oubangui. Edité par Olivry J.C. et Boulègue J., Grands bassins fluviaux. Actes du colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM. Paris, France. 22 au 24 Novembre. 159-170 pp.
- Centro de Ecología de Boconó. 1985. Rapport interne. Universidad de los Andes. Boconó-Trujillo, Vénézuéla.
- Clarke, F.W., 1924. Data of geochemistry, Vth Edition, US Geol. Survey Bull., 770. 841 pp.
- Cornieles, M. et Vallès, V., 1995. Effets de la production d'acidité par l'oxydation de pyrite sur la végétation et l'érosion dans le bassin versant du río Boconó-Andes vénézuéliens. 8^{ème} Réunion du GRESSAP. 12 septembre. ORSTOM. Montpellier. France.
- Cornieles, M., Vallès, V., Auque, L., Aventurier, A., et Reynier, B., 1996. Apports de la modélisation thermodynamique dans l'étude des propriétés chimiques des eaux acides. 9^{ème} Réunion du GRESSAP. 10 septembre. ORSTOM. Montpellier. France.
- Cornieles, M., Moussa, R., Ribolzi, O., et Vallès, V., 1996. Simulation des variations de la conductivité électrique d'un torrent par le couplage d'un modèle d'hydrologie de surface avec la distribution spatiale de la conductivité électrique sur le bassin versant du río Burate (Andes vénézuéliennes). 9^{ème} Réunion du GRESSAP. 10 septembre. ORSTOM. Montpellier. France.
- Cornieles, M., Huon, S., Roger, L., Travi, Y., Vallès, V., et Velázquez, F., 1996. Quelques aspects méthodologiques de l'étude des transferts d'eau et de M.E.S. dans un bassin versant andin. 21^{èmes} Journées scientifiques du GFHN. 26 novembre; Avignon. France.

- Cornieles., M. 1996. Apports de la modélisation thermodynamique dans l'étude des terres rares dans les eaux acides. 3^{ème} Colloque des jeunes chercheurs en géochimie du grand sud. Université d'Aix-Marseille. 19-20 septembre. France.
- Christophersen, N., Neal, C., Hooper, R.P., Vogt., R.D., et Andersen., S., 1990. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members - A step towards second generation acidification models, *J. Hydrol.*, 116, 307-320.
- Crouzet, E., Hubert, P., Olive., P., Siewertz., E., et Marce. A., 1970. Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. *J. Hydrol.*, 11, 217-229.
- Debye, Ph., et Hückel, E., 1923. Zur theorie der electrolytes. *Phys.*, 24. 185-325 pp.
- Degens, E.T., Kempe, S., Richey. J.E., 1991. Biogeochemistry of major world rivers In: *Biogeochemistry of major world rivers* (eds. Degens, Kempe et Richey) Scope 42, J. Wiley and Sons, 323-344.
- Degens, E.T., Kempe, S., Richey, J.E., 1991. Summary: Biogeochemistry of major world rivers. John Wiley and Sons, 356 pp.
- De Marsily, G., 1990. Un bassin versant expérimental et représentatif, qu'est ce que c'est ? CST, BVRE, MRT, ME, MINAGRI, MELTM.
- Duchaufour, P., 1978. *Manual de Edafología*. Masson, Paris. 471 pp.
- Durand, P., Neal, C., Lelong, F., et Didon-Lescot, J.F., 1991. Hydrochemical variations in spruce, beech and grassland areas. Mont Lozere, southern France. *J. Hydrol.*, 129. 57-70 pp.
- Duplessy J-C et Morel, P., 1990. *Gros temps sur la planète*. Ed. Odile Jacob. Paris. 293 pp.
- Eaton, F.M., 1950. Significance of carbonates in irrigation water. *Soil Sci.*, 69:123-133 pp.
- Errezaret, A., 1996. La dynamique torrentielle. Processus d'érosion, transport des matériaux et modélisation. Synthèse bibliographique. D.E.S.S. Université d'Avignon. 38 pp.
- Eshleman, K.N., Pollard, J.S., et O'Brien, A.K., 1993. Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations, *Water Resour. Res.*, 29, 3577-3587.
- Fontes, J.C., 1976. Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles. Quelques aspects. Thes. Doc. Sci.d'Etat. Université de Paris VI. 208 pp.
- Fristch, E., Planchon. O., et Boa, D., 1987. Programme HYPERABV, analyse structurale d'un bassin versant du nord-ouest ivoirien (Booro-Borotu): donnée physico-chimiques, résultats des analyses réalisées au centre ORSTOM d'Adiopodoumé. ORSTOM-Nancy.
- Fritsch, J.M., 1992 - Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en guyane française. Thes. Doc. Sci., Université de , France, 359 pp.
- Gac, J.Y., 1980. Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan d'altération de l'érosion et de la sédimentation. Travaux et documents de l'ORSTOM. n° 123. 245 pp.

- Garcia, B., 1996. Etude des mécanismes de distribution spatiale des formes minérales de l'azote dans un aquifère. Application à la plaine alluviale de la Vistrenque (Gard, France). Thes. Doc. Sci. Ecole Nationale du Génie Rural, des eaux et des forêts. Centre de Montpellier. 134 pp.
- Gimeno-Serrano, M.J., 1991 - Ambiente geológico y caracterización del sistema geoquímico "Arroyo del Val". Relaciones entre fases minerales y especies en disolución. Thesis. Universidad Zaragoza. España. 183 pp.
- Giresse, P., Ouetiningue, R., et Barusseau, J.P., 1990. Minéralogie et micro-granulométrie des suspensions et des alluvions du Congo et de l'Oubangui. Sci. Géol., Bull., Strasbourg, 43:2-4 pp.
- González de Juana, C., Ithurralde, A., et Picart-Cadillat, X., 1980. Geología de Venezuela y de sus cuencas petroleras. Caracas, FONINVES, 2 Tomes. 1031 pp.
- Graff, W.H., 1989. Flow resistance over a gravel bed-Its consequence on initial sediment movement. International workshop on fluvial hydraulics of mountains regions, Trent, Italy.
- Guyot, J.L., Jouanneau J.M., Quintanilla, J., et Wasson, J.G., 1993. Les flux de matières dissoutes et particulaires exportés des Andes par le río Béni (Amazonie bolivienne), en périodes de crue. Geodinamica Acta, 6(4): 233-241.
- Hayami, S., 1951. On the propagation of flow waves. Disaster Prev. Res. Inst. Bull.1. 1-16 pp.
- Heydarpour, D., 1974. Estimation de la composante souterraine de l'hydrogramme par les méthodes physico-chimiques. Thèse 3^{ème} cycle. Paris VI. 198 pp.
- Hubert, P., 1989. La séparation de l'hydrogramme. Apports des méthodes isotopiques, Hydrogéol., 3. 143-150 pp.
- Jin, C.X., 1992. A deterministic gamma-type geomorphologic instantaneous unit hydrograph based on peth types. Water Resour. Res. 28:2. 479-486 pp.
- Jordan, J.P., 1994. Spatial and temporal variability of stormflow generation processes on a Swiss catchment. J. Hydrol, 153:357-382 pp.
- Jhonson, A.M., 1970. Physical processes in geology. Freeman, Cooper and Company. San Francisco. 577 pp.
- Kattan, Z. Gac, J.L., et Probst, J.M., 1987. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin- Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. J. Hydrol, 92: 59-76 pp.
- Laraque, A., et J.P. Olivry, J.C., 1996. Evolution de l'hydrologie du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite et dynamique et dynamique des transports solides et dissous. L'hydrologie tropical: géoscience et outil pour le développement. Actes de la conférence de Paris, mai 1995. IAHS, 238. 271-288 pp.
- Leaney, F.W., Smetten, K.R.J., et Chittleborough, D.J., 1993. Estimating the contribution of preferential flow to subsurface runoff from a hillslope using deuterium and chloride. J. Hydrol. 147: 83-103 pp.
- Lefort, Ph., 1991. Etude générale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôt. Formule globale SOGREA. La Houille Blanche 6. 449-456 pp.

- Loye-Pilot, M.D., et Jusserand, C., 1990. Décomposition chimique et isotopique d'un hydrogramme de crue d'un torrent méditerranéen - Réflexions méthodologiques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, 211-231 pp.
- Marc, V., et Travi, Y., 1992. Traçage chimique et isotopique des composantes de l'écoulement sur un petit bassin versant méditerranéen (Réal Collobrier). *Travaux U.R.A. 903 du CNRS*, XXI, 17-28 pp.
- Marc, V., 1994. Etude de la relation pluie-débit sur un bassin versant en climat méditerranéen par le traçage chimique et isotopique naturel de l'eau, doctoral thesis, Univ. of Avignon, 293 pp.
- Mariotti, A., 1991. le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et d'évolution des paléoenvironnements continentaux. *Cah. ORSTOM, séri. Pédol.*, vol XXVI, n° 4: 299-313.
- Marius, Cl., et Lucas, J., 1982. Evolution géochimique et exemple d'aménagement des mangroves au Sénégal (Casamance). *Oceanologica Acta*. n° SP. 151-160 pp.
- Marius, C.I., 1984. Contribution à l'étude des mangroves du Sénégal et de la Gambie-Ecologie-Pédologie-Géochimie. Mise en valeur et aménagement. *Cahier ORSTOM. Série Pédologie*. Vol., XXI, n° 1: 84-85. 127-131 pp.
- Martin, C., 1986. Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques. L'exemple du massif des Maures. Thèse d'Etat, Paris I. 935 pp.
- M.A.R.N.R., 1988. Boletín de actualización de la información hidrométrica Nacional. Zonas 7 y 16. Estados Trujillo y Mérida: Péridodo 1975-1986. Caracas. 119-19 pp.
- M.A.R.N.R., 1990. Proyecto conservacionista integral para la cuenca alta del río Boconó. Versión final. 85 pp.
- M.A.R.N.R., 1991. Documents internes de la Division de hydrologie. 2 pp
- M.A.R.N.R., 1995. Documents internes de la Division de hydrologie. 3 pp.
- Matsubayashi, U., Velázquez, G.T., et Fusetsu, T., 1993. Hydrograph separation and flow analysis by specific electrical conductance of water. *J. Hydrol.* 152:179-199 pp.
- McDonnell, J.J., Bonell, M., Stewart, M.K., et Pearce, A.J., 1990. Deuterium variations in storm rainfall: Implications for stream hydrograph separation, *Water Resour. Res.*, 26, 455-458 pp.
- Mc Donnell, J.J., Stewart, M.K., et Owens, I.F., 1991. Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response. *Wat. Res. Res.* 27,12: 3065-3073 pp.
- Merlo, S., Jusserand, C., Olive, Ph., et Zuppi G.M., 1996. pCO₂ et minéralisation du carbone dans la zone non saturée du site des eaux minérales de Thonon-Les Bains (Haute Savoie). 21^{ème} Journées GFHN. Avignon 26-27 novembre
- Mérot, Ph., et Bruneau, P., 1993. Echelle spatiale représentative d'un bassin versant sur le plan géochimique: une première approche. 18^{èmes} Journées scientifiques du GFHN. Rennes. 23-24 novembre. 114-188 pp.
- Mérot, Ph., Bourguet, M., et Le Leuch, M., 1981. Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18 mesure dans les pluies, le sol, le ruisseau, *Catena*, 8, 69-81.

- Meunier, M., 1991. Elements d'hydraulique torrentielle. Cemagref, série Etudes Montagne N° 1. 278 p.
- Meunier, M., 1994. Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels, in Effets des crues sur le lit des torrents. Colloque Transports solides. Société Hydrotechnique de France. La Houille Blanche n° 3, pp. 25-31.
- Meybeck, M., 1981. River transport of organic carbon to the ocean. IN: Flux of organic carbon by rivers to the oceans. Likens G.E., ed., Dept. of Energy, NTIS Report, Conf-8009140, UC-11, Springfield, Virginia, 219-269 pp.
- Meybeck, M., 1984. Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Meybeck, M., 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. Sci. Géol., Bull., 39, 1, p. 3 - 77.
- Meybeck, M., 1993. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget. Water, Air, and soil Pollution, 70:443-463.
- Meybeck, M., 1995. Origin and variable composition of present day riverborne material. Global Surficial fluxes, Modern to glacial. Studies in geosciences, Nat. Acad. Sci. Washington. D.C.
- Meyer-Peter., E. et Muller, R., 1948. Formulas for bed load transport. Association Internationale pour les travaux Hydrauliques, 2. Rapport, Sctokolm. 39-64 pp.
- Millet, A., 1996. Bilans hydriques et géochimiques dans le cycle forestation déforestation: le cas des forêts tropicales. Mem. Sc. Terre. Université Pierre et Marie Curie, Paris, n° 96-10, 199 pp.
- Moussa, R., 1991. Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique. Application au bassin du Gardon d'Anduze. PhD Thesis. Université de Montpellier II. 314 pp.
- Moussa, R., et Bouquillon, C., 1994. TraphyC-BV: hydrological information system. Environ. Software. n° 9; 217-226 pp.
- Nakamura, R., 1971. Runoff analysis by electrical conductance of water. J. Hydrol. 14:197-212 pp.
- Neal, C., Neal, M., Warrington, A., Avila, A., Pinol, J. et Roda, F., 1992. Stable hydrogen and oxygen isotope studies of rainfall and streamwaters for two contrasting holm oak areas of Catalonia, northeastern Spain. J. Hydrol., 140, p. 178.
- Nordin, C.F., et Meade, R.H., 1986. The Amazon and the Orinoco. McGraw Hill Yearbook of science and technology. 385-390 pp.
- Ogunkoya, O.O., et Jenkins, A., 1993. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model, J. Hydrol., 142, 71-88.
- Olivry, J.C., 1977. Transports solides en suspension au Cameroun. In: Erosion and soil matter transport in Inland Waters. Proc. Symp. Paris. IAHS, publ. n° 122. 134-141 pp.
- Olivry, J.C., Briquet, J.P., Thibaux, J.P., et Sigha N., 1988. Transport de la matière sur les fleuves des régions intertropicales: Les premiers résultats des mesures de flux particulières sur le bassin du fleuve Congo. Sediment Budgets (Proceeding of the Porto Alegre Symposium) IAHS Publ. n) 174.

- Olivry, J.C., 1989. Présentation du programme de mesure de flux particulaires et dissous sur les grands bassins fluviaux équatoriaux péri-atlantiques. Quatrèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM. Septembre. Montpellier. 147-154.
- Olivry, J.C., 1990. Géodynamique de l'hydrosphère continentale-rapport d'activité de l'UR 2A (1987-1990), ORSTOM, Département Eaux Continentales, 147 pp.
- Olivry, J.C., et Hoorelbeck, J., 1989-1990. Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch (France, Alpes du sud). Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol XXV, n° 1-2: 95-110.
- Olivry, J.C., Bricquet, J.P., Laraque, A., Guyot, J.L., Bourges, J., et Roche, M.A., 1993. Flux liquides, dissous et particulaires des deux grands bassins intertropicaux: le Congo à Brazzaville et le río Madeira à Villabella. Grands bassins fluviaux. Actes du colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM. Paris, France. 22 au 24 Novembre 1993. 345-424.
- Olivry J.C., et Boulègue J., 1995. Grands bassins fluviaux péri-atlantiques. Congo, Niger, Amazone- Actes du Colloque PEGI (INSU/CNRS/ORSTOM)- ORSTOM. Ed. Collection Colloques et Seminaires. Paris, 22-24 Novembre 1993. 55 PP.
- Payne, B.R., 1988. The status of isotope hydrology today. J. Hydrol. 100:207-237.
- Pearce, A.J., Stewart, M.K., et Sklash, M.G., 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments 1. Where does the water come from ?, Water Resour. Res., 22, 1263-1272.
- Pedros, Georges., 1990. Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. Journées hydro-pédologique de l'ORSTOM. 5^{èmes} Journées hydrologiques de l'ORSTOM. Montpellier; 12-13 Septembre 1989. 3-4 pp
- Pérez, G., 1984. Estimación del factor K de Erodabilidad del suelo en la cuenca alta del río Boconó. Trabajo de pasantía de la Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de los Andes.
- Pfannkuch, H.O., 1964. Contribution à l'étude des déplacements des fluides miscibles dans un milieu poreux. Revue de l'Institut Français du Pétrole. vol. 18 n° 2: 215-270 pp.
- Pouyllau, M., 1989. Géomorphologie du Vénézuéla: Carte à 1/4 000 000 et bibliographie sélective. Vénézuéla environnements et changements. Tome 2. 5-37 pp.
- Quian Ning, Wan Zhaohui., 1986. A critical review of the research on the hyperconcentrated flow in China. IRTCES. Beijing. China. 43 pp.
- Ribolzi, O., 1996. Etude des mécanismes de genèse des crues par le traçage naturel (chimique et isotopique) sur un bassin versant méditerranéen cultivé (Roujan, Hérault, France). Thes. Doc. Sci. Université de droit des sciences et d'économie d'Aix-Marseille III. Faculté des sciences et techniques de Saint Jérôme. France. 188 pp.
- Ribolzi, O., Vallès, V. et Bariac, T., 1996. Comparison of hydrograph deconvolutions using residual alkalinity, chloride and oxygen 18 as hydrochemical tracers. Water Resour. Res., 32 (4) 1051-1059.
- Rickenman, D., 1990. Bed load transport capacity of slurry flows at steep slopes. Zurich, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich. 103. 249 pp.
- Rickenman, D., 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slope. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 117:11. 1419-1439 pp.

- Reaud, Guilène., 1989. Végétation et utilisation du sol dans la région Guanare-Masparro, Andes Vénézuéliennes. *Vénézuéla environnements et changements*. Tome 2. 137-196 pp.
- Ribolzi, O., Vallès, V., et Barbiero, L., 1993. Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan, *Science du Sol*, 31, 77-95 pp.
- Richtmeyer, R., et Morton, K., 1967. Difference methods for initial value problems. *Interscience*, Mew York. 405 pp.
- Richey, J.E., Victoria, R.L., Forsberg, B.R., 1990. The biogeochemistry of a major river system: the Amazon case study. *Biogeochemistry of major world rivers*. John Wiley and Sons.
- Seyler, P., Etcheber, H., Orange, D., Laraque, A., Sigha-Nkamdjou, L., et Olivry, J.C., 1993. Concentration, fluctuations saisonnières et flux de carbone dans le bassin du Congo. Grands bassins fluviaux. Actes du colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM. Paris, France. 22 au 24 Novembre. 217-228 pp.
- Sauret, B., Colas, G., 1986. Coulées de boue-laves torrentielles. CETE. Aix-en-Provence. 44 pp.
- Scatchard, G., 1936. Concentrated solutions of strong electrolytes. *Chemical Res.*, 19. 309 pp.
- Schlesinger, W.H. et Melack, J.M., 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus*, 33: 87-172 pp.
- Smart, G et Jaeggi, M.R. 1983. Sediment transport on steep slopes. Zurich, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH n°64. 191 pp.
- Stein, N., 1981. Is the large-scale destruction of tropical rainforests necessarily crucial for the global carbon cycle? In: Fazzolare S.A. and Smith C.B. (Eds). *Beyond the energy crisis, opportunity and challenge*, vol IV, Pergamon Press.
- Stumm, W., et Morgan, J.J., 1981. *Aquatic chemistry*. Editions Wiley-Interscience, New York, 780 pp.
- Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flows. *J. of hydraulics Division, ASCE*, vol. 104, n° HY8, 1153-1169.
- Travi, Y., Lavabre, J., Blavoux, B. et Martin, C., 1994. Traçage chimique et isotopique (Cl^- , ^{18}O) d'une crue d'automne sur un petit bassin versant Méditerranéen incendié, *Hydrolog. Sci. J.*, 39, 605-619.
- Vallès, V., et DeCockborne, A.M., 1992. Elaboration d'un logiciel de géochimie appliquée à l'étude de la qualité des eaux, in *Colloque altération et restauration de la qualité des eaux continentales*, edited by INRA Dossiers de la Cellule Environnement, Port-Leucate, France, 27-30.
- Vallès, V., Pachepsky, Y.A., et Ponizovsky, A.A., 1991. Invariant criteria for irrigation water quality assessment in arid and semiarid regions. In: *Genesis and control of fertility of salt-affected soils*. ISSS Subcommittee on salt-affected soils, All-Union Society of Soil Science, USSR, V.V. Dokuchaev Soil Institute. Moscow. 330 - 333 pp.
- Vallès, V., Auque, L., Rezagui, M., Semadi, A., et Roger L., 1996. Geochemistry of saline soils in two arid zones of the mediterranean basin. I: Geochemistry of the Monegros-Aragon. Spain. soumis à *Arid Soils Research and rehabilitation*. (Sous presse)

- Vallès, V., Belaud, A., Bourgeat, F., et Guiesse, M., 1990. Etude de la relation débit/concentration en élément dissous dans des eaux drainées de Boulbene. Actes du colloques les sols de Boulben. AFES S.O., Toulouse 18 et 19 octobre. 14 pp.
- Vallès, V., Gholami, M., et Lambert, R., 1990. Chimie des eaux et alimentation du bassin versant de Djajerud (Iran). *Hydrol. continent.*, 5, 1, p. 61-69 pp.
- Vallès, V., Bertrand, R., Bourgeat, F., et N'diaye, M., 1989. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques, *Agron. trop.*, 44, 3, 157-163 pp.
- Vallès, V., et Bourgeat F., 1988. Geochemical determination of gypsum requirement of cultivated sodic soil. I. Development of the thermodynamic Model GYPSOL. Simulation of the irrigation water-soil chemical interactions. *Arid Soils Research and rehabilitation*. 2. 165-177 pp.
- Vallès, V., 1987. Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux application au calcul des doses d'irrigation, *Sci. Géol., Mém.*, 79, 148 pp.
- Vallès, V., Vallès, A.M., et Vieillefon, J., 1986. Etude de la modélisation hydrodynamique d'un sol argileux de la bsse vallée de l'Oued Medjerdah (Tunisie). *Bulletin du Groupement Français d'Humidimétrie Neutronique*. n0 20. 53-72 pp.
- Vallès, V., 1985. Etude et modélisation des transfert d'eau et des sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thes. Doc. Sci. Institut National Polytechnique de Toulouse. 141 pp.
- Varnes, D.J., 1958. Landslides types and processes. *Highway Res. Board. Spec. Rep.* 29: 20-47.
- Van Beek, C. G. E. M., et Van Bremen, N., 1973. The alkalinity of alkali soils, *J. Soil Sci.*, 24, 129-136 pp.
- Velázquez, F., et Giovany Pérez., 1990. Análisis Preliminar de la creciente del 05/04/90. Río Boconó en la Cavita. Rapport interne du Centro de Ecología de Boconó. PLANINDECHI. Convenio CEB-MARNR. 21 pp.
- Velázquez, F., 1994. Mediciones de caudales y sedimentos en cuencas bajo tratamiento conservacionista. 2^{do} Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrograficas. Mérida, 6-11 Noviembre. 166-177 pp.
- Velázquez, F., 1995. Communication personnel.
- Velázquez, F., 1996. Communication personnel.
- Verhaeghe, I., et Boulègue J., 1993. Transport et dépôt de l'or dans l'Amazone en crue. Grands bassins fluviaux. Actes du colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM. Paris, France. 22 au 24 Novembre. 375-390 pp
- Visocky, A.P., 1970. Estimating the groundwater contribution to storm runoff by the electrical conductance. *Groundwater*. 8:5-10 pp.
- Voltz, M., Andrieux, P., Bocquillon C., et Rambal S., 1994 - Le site atelier ALLEGRO Languedoc. Actes du Séminaire National hydrosystèmes, Paris 10-11 mai 1994. Edité par le CEMAGREF, pp. 121-129 pp.
- Wels, C., Cornett, R.J., et Lazerte B.D., 1991. Hydrograph separation: A comparaison of geochemical and isotopic tracers. *J. Hydrol.* 122: 253-274 pp.

- William, M. L. Jr., Stephen, K. H., Sandra, L. J., et Donald, D.R., 1987. Major element chemistry, weathering and element yields for the Caura river drainage, Venezuela. *Biogeochemistry*. 4: 159-181 pp.
- William, M. L. Jr., et James, F.S., 1989. Concentration and transport of dissolved and suspended substance in the Orinoco river. *Biogeochemistry*. 7: 203-240 pp.
- Wood, E., Sipalavan, M., et Beven, K., 1990. Similary and scale in catchment storm response. *Rev. Geophys.* 28. 1-18 pp.
- Wood, E., Sipalavan, M., Beven, K., et Band, L.1988. Effect of spatial variabilty and scale with implication to hydrological modeling. *J. hydrol.*102: 24-47 pp.

LISTE DES TABLEAUX.

- Tableau I.1: Synthèse des résultats de décomposition d'hydrogrammes sur bassin versant depuis 1986 (d'après Marc 1994)
- Tableau I.2: Formes spécifiques du carbone présente dans le matériel de rivières (D'après Meybeck, 1993)
- Tableau I.3: (d'après Thierry, 1914 et Meunier, 1991)
- Tableau I.4: Récapitulatif des mécanismes érosifs du lit selon la disponibilité des sédiments. (d'après Errezarret, 1996)
- Tableau I.5: Récapitulatif de quelques méthodes d'estimation du transport solide par charriage (d'après Errezarret, 1996)
- Tableau II.1: Principaux traits morphométriques et hydrologiques du bassin versant du Río Boconó.
- Tableau III.1: Récapitulatif des séries de prélèvements pour la partie spatiale.
- Tableau III.2 Récapitulatif des séries de prélèvements pour la partie temporelle.
- Tableau III.3: Chronologie des hauteurs précipitées pour l'épisode de 1994. Valeurs exprimées en mm.
- Tableau III.4: Pluviométrie enregistrées dans les différentes stations du bassin le 9 juillet 1995.
- Tableau III.5: Pluviométrie enregistrées dans les différentes stations du bassin le 14 juillet 1995.
- Tableau IV.1: Valeurs caractéristiques de divers pôles pour la matière organique; moyennes réalisées sur plusieurs échantillons du bassin versant pour chacun des pôles
- Tableau IV.2: Composition chimique et quantités de feldspaths utilisées pour la simulation.
- Tableau IV.3: Composition chimique de l'eau des différentes unités géographiques du bassin versant du río Boconó.
- Tableau IV.4: Stabilité des traceurs.
- Tableau V.1 : Caractéristiques d'eaux de ruissellement dans les zones acides des Jarillos; L'échantillon K0 a été prélevé dans des ravines sur schistes pyriteux lors de la crue, J6 plus en amont provient du contact schiste pyriteux/grès et a été prélevé le lendemain.
- Tableau V.2 : Comparaison entre la granulométrie des sédiments de Jarillos pour l'eau de ruissellement, début de crue (K1 et K2) et de la fin de la crue (K15). Les mesures ont été réalisées sur la totalité de l'échantillon.
- Tableau V.3: Caractéristiques du carbone organique particulaire dans les différentes unités. Moyennes établies d'après les résultats de la campagne de prélèvements spatiaux.
- Tableau V.4 Caractérisation physico-chimique des deux affluents de la quebrada Corojó.
- Tableau VI.1: Récapitulatif des quantités d'eau, d'éléments dissous et particuliers exportées par le Burate; Valeurs estimées grâce à la décomposition de l'hydrogramme.
- Tableau VI.2: Comparaison des exportations en eau, charge dissoute et MES pour les deux épisodes de crue du 15-16 juillet 1994 sur le sous bassin de Boconó.
- Tableau VI.3: Comparaison des exportations en M.E.S. et la charge dissoute entre les rivières Burate et Boconó pour la crue du 9 au 10 juillet 1995.
- Tableau VI.4: Comparaison des exportations en M.E.S. et la charge dissoute entre les rivières Burate et Boconó pour la crue du 9 au 10 juillet 1995. Les lignes marquées par * correspondent à des estimations effectuées à partir de la décomposition des hydrogrammes.
- Tableau VI.5: Principales caractéristiques et comparaison des exportations en M.E.S. et C.T.D. entre le bassin versant de l'Orénoque (Depetris et Paolini, 1991) et la rivière Boconó.

Tableau VI.6: Estimation du volume de sédiment accumulés dans l'entrée du barrage entre le début de la mise en eau et juillet 1995. Les volumes indiqués sont ceux compris entre la cote considérée et la cote 240m.

Tableau VI.7: Paramètres retenus pour la simulation avec quatre pôles géographiques.

Tableau VI.8: Valeurs caractéristiques du réseau hydrographique utilisées pour tester la sensibilité du modèle.

Tableau VI.9: Paramètres retenus pour la simulation de la crue du Boconó avec quatre pôles géographiques.

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1: Exemple de diagramme de mélange (EMMA) à trois pôles: (1) nappe de la dépression, (2) ruissellement et (3) nappe du plateau dans un bassin versant cultivé (D'après Ribolzi, 1996).
- Figure I.2: Les différents types de transports solides (d'après Meunier, 1994)
- Figure I.3: Domaine des comportements newtonien et non newtonien (d'après Quian Ning et Wan Zhaohui, 1986).
- Figure II.1: Coupe schématique de la structure des Andes au niveau du bassin versant du Río Boconó (d'après Pouyllau (1989).
- Figure II.2: Image radar des Andes Vénézuéliennes au niveau du bassin versant du río Boconó.
- Figure II.3: localisation et morphologie du bassin versant du río Boconó
- Figure II.4: Carte lithologique simplifiée du bassin versant.
- Figure II.5: Répartition de la pluie dans le bassin versant du Boconó.(d'après Velásquez, 1985)
- Figure II.6: Localisation des différentes stations météorologiques dans le bassin versant du río Boconó.
- Figure II.7: Répartition de la saison sèche et de la saison humide pour l'ensemble du bassin versant du Boconó.
- Figure II.8 : Carte de végétation et d'occupation des sols.
- Figure II.9: Profils hypsométrique de la rivière Boconó jusqu'à l'exutoire.
- Figure II.10: Profils hypsométriques du Boconó et des principaux torrents étudiés.
- Figure II.11: Profil de surface réceptrices dans la rivière Boconó.
- Figure II.12: Profil de surface réceptrices dans la rivière Burate.
- Figure II.13: Réseau hydrographique du sous-bassin du Río Boconó avant sa confluence avec le Burate.
- Figure II.14: Hydrogramme de la rivière Boconó avant la confluence Boconó-Burate pour la période 1978-1981 (M.A.R.N.R., 1988)
- Figure II.15: Réseau hydrographique du bassin versant du rio Burate
- Figure II.16 : Carte du bassin versant du torrent Corojo.
- Figure II.17: Carte du bassin versant du torrent des Jarillos.
- Figure II.18: Réseau hydrographique du Río Boconó dans le massif du Guaramacal.
- Figure II.19: Fréquence des crues en fonction de leur débit maximum (dessiné d'après Velásquez, 1990).
- Figure III.1: Carte du bassin versant du torrent des Jarillos. Localisation des sites de prélèvement.
- Figure III.2: Carte du bassin versant du torrent Corojo. Localisation des sites de prélèvement.
- Figure III.3: Réseau hydrographique du sous-bassin du Río Boconó avant sa confluence avec le Burate.
- Figure III.4: Réseau hydrographique du Río Boconó dans le massif du Guaramacal. Localisation des points de prélèvements.
- Figure III.5 : Réseau hydrographique du bassin versant du Rio Burate.
- Figure III.6: Carte de localisation des prélèvements à l'exutoire et dans le barrage.
- Figure III.7: Relation entre limnigraphie du Burate et débits estimés par différence entre l'amont et l'aval de la confluence dans la rivière Boconó.
- Figure III.8: Variations de la conductivité électrique (a), des teneurs en chlorure (b) et sulfate (c) ainsi que du taux de M.E.S. (d) dans la section du Río Boconó à l'exutoire.
- Figure III.9: Comparaison des mesures doublées lors des crues du 15-16 juillet 1994 sur la rivière Boconó pour la conductivité électrique (a), l'alcalinité (b), le sulfate (c), le

chlorure (d) et le taux de M.E.S. (e). Chaque figure comporte deux courbes enveloppes.

- Figure III.10: Comparaison des mesures doublées lors des crues du 15-16 juillet 1994 sur à l'exutoire pour la conductivité électrique (a) et le taux de M.E.S. (b). Chaque figure comporte deux courbes enveloppes.
- Figure IV.1: Carte de répartition des prélèvements d'eaux des campagnes spatiales pour l'analyse des éléments dissous.
- Figure IV.2: Distribution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux dans le bassin versant du rio Boconó. Cartes réalisées par krigeage à partir de toutes les données des campagnes spatiales de prélèvements.
- Figure IV.3: Distribution du $\delta^8\text{O}$ des pluies dans le bassin versant du río Boconó.
- Figure IV.4: Spatialisation du $\delta^{13}\text{C}$ réalisées sur des sédiments et végétaux des différentes cours d'eau dans le bassin versant du río Boconó.
- Figure IV.5: Faciès chimiques des eaux prélevées lors des campagnes spatiales 1994 et 1995. A Faciès carbonaté calcique; B Faciès carbonaté calco-sodique; C Faciès mixte carbonaté-sulfaté calcique; D Faciès sulfaté calcique (et aluminique).
- Figure IV.6: Diagramme d'équilibre des eaux de la campagne de spatialisation avec la calcite et le gypse.
- Figure IV.7: Evolution du pH et de la teneur en aluminium total dissous lors de l'altération de feldspaths potassique, sodique et calcique en présence de quartz, avec précipitation de kaolinite. Les quantités de feldspaths sont indiquées dans le texte.
- Figure IV.8: Résultats de simulation de l'altération de la pyrite dans divers environnements minéralogiques et pressions partielles en CO_2 . Eau pure (a) et (b), eau + kaolinite (c), eau + calcite (d).
- Figure IV.9: Diagramme de Pourbaix de l'azote, du soufre et du fer (a, b et c) et profils d'anoxie (d et e) dans les sédiments du barrage.
- Figure IV.10: Résultats de la simulation de la réduction des eaux interstitielles des sédiments du barrage.
- Figure IV.11 : Gradient altitudinal des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ des pluies sur le bassin versant (3 au 19 juillet 1995).
- Figure IV.12: Comparaison du $\delta^{13}\text{C}$ (a) et du rapport C/N (b) entre les feuilles, les litières et les sédiments de divers sites des branches Boconó et Burate.
- Figure V.1: Limnigramme du torrent Los Jarillos de la crue du 14 juillet 1995. Le niveau relatif 0 de l'échelle limnigraphique correspond à un écoulement de base.
- Figure V.2: Variations temporelles des teneurs en éléments dissous lors de la crue du 14 juillet 1995 du torrent des Jarillos.
- Figure V.3: Variations de la pression partielle en CO_2 et de l'Alcalinité Résiduelle Calcite dans le torrent des Jarillos.. Comparaison avec la conductivité électrique.
- Figure V.4: Variations temporelles du taux de M.E.S. dans le torrent des Jarillos.
- Figure V.5: Evolution de la granulométrie des M.E.S. dans le torrent des Jarillos.
- Figure V.6 : Evolution du C.O.P.(c) du rapport C/N (a) et du $\delta^{13}\text{C}$ (b) dans les M.E.S. du torrent los Jarillos lors de la crue du 14 juillet 1995.
- Figure V.7 : Limnigramme et pluviogramme du torrent Corojó pour l'épisode du 9-10 juillet 1995.
- Figure V.8: Variations temporelles du premier groupe de paramètres pour Corajo.
- Figure V.9: Variations temporelles du sulfate et du chlorure lors de la crue du 9-10 juillet 1995 dans le torrent Corajo.
- Figure V.10: Essai de décomposition semi-quantitative du limnigramme de la Quebrada Corojó à partir de la conductivité électrique (crue du 09 au 10 juillet 1995).

- Figure V.11: Essai de décomposition semi-quantitative du limnigramme de la Quebrada Corojó à partir de SO_4 (cruée du 09 au 10 juillet 1995).
- Figure V.12: Variations temporelles de la pCO_2 (a) et de la teneur en potassium (b).
- Figure V.13: Variations du taux de M.E.S. lors de la crue du 9-10 juillet 1995 du torrent Corajo.
- Figure V.14: Variations du taux de matières fines (diamètre $<100\mu\text{m}$) dans les M.E.S. du torrent Corajo.
- Figure V.15: (a) évolution du taux de C.O. lors de la crue. (b) évolution des signaux isotopiques du $\delta^{13}\text{C}$. (c) le rapport C/N lors de la crue du 9 au 10 juillet 1995.
- Figure V.16: Variations du coefficient de dispersion apparent selon la vitesse de l'eau (D'après Pfankuch, 1964).
- Figure VI.1: Hydrogramme et pluviogrammes pour la crue du 09 au 10 juillet 1996. (a) Hydrogramme en débit et (b) Hydrogramme en débit spécifique.
- Figure VI.2: Evolution temporelle du premier groupe de paramètres lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.
- Figure VI.3: Essai de décomposition géographique de l'hydrogramme du Burate avec la conductivité électrique. Les deux pôles choisis sont le secteur Vitisay et les zones cristallines (constituées du bassin Tomon et du haut Burate).
- Figure VI.4: Variations temporelles des teneurs en sulfate (a) et en magnésium (b) lors de la crue du Burate.
- Figure VI.5 : Evolution du chlorure, sodium, température et l'oxygène-18 lors de la crue du 09 au 10 juillet 1996.
- Figure VI.6: Evolution de la pCO_2 estimée lors de la crue du Burate les 9-10 juillet 1995. Les valeurs sont issues des calculs avec AQUA, à partir des mesures de terrain (pH) et de laboratoire (composition chimique).
- Figure VI.7: Variations temporelles de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (a) et du pH (b) pour la crue du Burate des 9-10 juillet 1995.
- Figure VI.8: Variations temporelles du taux (a) et du flux (b) de M.E.S., du cumul de Charge Totale Dissoute (d) et M.E.S. (c) exportés. Variations de la granulométrie (e), pour la crue du Burate.
- Figure VI.9 : Evolution des fractions fines et grossières des M.E.S. lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.
- Figure VI.10 : Evolution temporelles des différents paramètres du Carbone Organique Particulaire (C.O.P.) lors de la crue du 9 au 10 juillet 1995. (a) variations du $\delta^{13}\text{C}$, (b) variations du taux du C.O.P., (c) variations du rapport C/N et (d) flux du C.O.P.
- Figure VI.11: Hydrogramme et pluvio-gramme du 15 et 16 juillet 1994. La pluviométrie est une moyenne entre les stations météorologiques Paramo Cristalina et Boconó aeropuerto. Cette moyenne cache de fortes disparités.
- Figure VI.12: Evolution temporelle du premier groupe de paramètres physico-chimiques. Pour la crue du 15 au 16 juillet 1994 à Boconó-ville.
- Figure VI.13: Variations temporelles des teneurs de potassium, sulfate et du phosphate lors de la crue du 15 au 16 juillet 1994.
- Figure VI.14: Variations temporelles des teneurs en chlorure et en sodium. Chaque valeur est la moyenne entre deux prélèvements simultanés.
- Figure VI.15: Variations temporelles de l'Alcalinité Résiduelle Calcite (ARC) pour les crues du 15-16 juillet 1995 à la ville de Boconó.
- Figure VI.16: Variations temporelles du taux de M.E.S. (a), du flux de M.E.S. (b), des exportations cumulées de M.E.S. (c) et Charge Totale Dissoute (d).
- Figure IV.17: Evolution de critères minéralogiques semi-quantitatifs à partir de mesures sur des diffractogrammes de rayons X. (a) relation argiles 7\AA /argiles Totales, (b)

relation Amphibole/Quartz, (c) relation Micas:Quartz, (d) relation Chlorite/Argiles Totales.

- Figure VI.18: (a) Hydrogramme et hyétogramme de la crue du río Boconó du 9-10 juillet 1995. Stations météorologique: Guar= Guaramacal R. Negro= valeur moyenne entre río Negro et Campo Elías Boco= Moyenne entre Boconó aéroport et Boconó MOP. (b) hydrogramme spécifique.
- Figure VI.19: Variations temporelles des paramètres du premier groupe, pour la crue du Boconó 9-10 juillet 1995.
- Figure VI.20 : Evolution du sodium, le chlorure, la température et le ^{18}O lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995
- Figure VI.21: Evolution du potassium et le nitrate lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.
- Figure VI.22: Evolution du magnésium lors de la crue du 09 au 10 juillet 1995.
- Figure VI.23: Evolution de l'Alcalinité Résiduelle Calcite et de la pCO_2 lors de la crue du Boconó du 09 au 10 juillet 1995.
- Figure VI.24: Variations temporelles du taux (a), du flux (b) de M.E.S., de la proportion de particules fines (c), de la granulométrie (d) et quantités cumulées des exportations de M.E.S. (e) pour la crue d Boconó du 9-10 juillet 1995.
- Figure VI.25: Evolution temporelle des caractéristiques de la matière organique des M.E.S. lors de la crue des 9-10 juillet 1995 dans la rivière Boconó. Evolution du taux de C.O.P. (a), du rapport C/N (b) et du $\delta^{13}\text{C}$ (c).
- Figure VI.26: Hydrogramme (a) de la confluence Boconó/Burate et volume d'eau exporté (b), lors de la crue du 9-10 juillet 1995.
- Figure VI.27: Variations temporelles du premier groupe de paramètres pour la confluence Boconó/Burate, lors de la crue du 9-10 juillet 1995.
- Figure VI.28: (a) et (b) Comparaison entre la conductivité électrique de la confluence et celle des différents affluents; CE Boc= Boconó; CE Bur= Burate; CE Cor= Corojó.
- Figure VI.29: Variations temporelles du second groupe de paramètres chlorures (a); sodium (b); $\delta^{18}\text{O}$ (c); et température (d), à la confluence Boconó/Burate.
- Figure VI.30: Variation temporelles de l'alcalinité résiduelle calcite (a) et de la teneur en potassium (b).
- Figure VI.31: Evolution du taux (a) et du flux de M.E.S. (b) à la confluence Boconó/Burate. Estimations des exportations cumulées de M.E.S. (c) et de charge totale dissoute (d).
- Figure VI.32: Hydrogramme estimé à partir de la vitesse de remplissage de la retenues de Peña Larga les 15-16 juillet 1994.
- Figure VI.33: Variations temporelles des teneurs en éléments dissous à l'exutoire du bassin versant lors des crues du 15-16 juillet 1995.
- Figure VI.34: Variations temporelles de l'alcalinité résiduelle calcite et du potassium lors des crues des 15-16 juillet 1994 à l'entrée du barrage.
- Figure VI.35: Variations temporelles du taux, du flux et du total de M.E.S. exportée lors des crues du 15-16 juillet 1994 à l'entrée dans la retenue de Peña Larga.
- Figure VI.36 : Variations verticales des fractions granulométriques 0-50 μm et 50-100 μm pour différents profils de sédiments prélevés dans le retenue de Peña Larga.
- Figure VI.37: Simulation des transferts d'eau et de solutés dans le bassin versant du Burate (crue du 9-10 juillet 1995). Calculs à partir de trois pôles géographiques; un pôle Vitisay, un pôle Tomón et un pôle Haut Burate (Coneja). (a): Comparaison entre débits à l'exutoire mesurés (trait épais) et calculés (trait fin). (b) Contribution des différents sous bassins (c) Comparaison entre conductivité mesurée (trait plein) et simulée (trait fin).
- Figure VI.38: Simulation des transferts d'eau et de solutés dans le bassin versant du Burate (crue du 9-10 juillet 1995). Calculs à partir de quatre pôles géographiques; 2 pôles

Vitisay, un pôle Tomón et un pôle Haut Burate (Coneja).(a): Comparaison entre débits à l'exutoire mesurés (trait épais) et calculés (trait fin).(b) Contribution des différents sous bassins(c) Comparaison entre conductivité mesurée (trait plein) et simulée (trait fin).(d) Comparaison entre $\delta^{13}\text{C}$ mesuré (trait plein) et simulé (trait

Figure VI.39: Résultats de simulation des transferts d'eau et de soluté pour de fausses caractéristiques morphologiques du réseau hydrographique; Simulations de l'hydrogramme (a) et du chimiogramme (b).

Figure VI.40: Comparaison entre valeurs simulées et valeurs mesurées pour les débits (a) et la conductivité électrique (b).

TABLE DES MATIERES	Page
AVANT-PROPOS	
SOMMAIRE	1
INTRODUCTION	3
- Intérêt de la thématique	
- Objectifs Généraux de la thèse	
- Démarche retenue	
CHAPITRE I	5
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TRANSFERT D'EAU, DE SOLUTES ET MATIERES EN SUSPENSION DANS LE BASSIN VERSANTS TORRENTIELS.	
1.1 Hydrologie de bassin versant: apports du traçage naturel pour l'étude des transferts d'eau et des solutés	5
1.1.1 Rappels sur le concept de B.V.	5
1.1.2 Le traçage naturel en hydrologie; concepts, intérêt et limites	6
1.1.3 Applications du traçage et du marquage naturel en hydrologie	8
1.2 Erosion, hydrologie et hydraulique torrentielles	15
1.2.1 Processus élémentaires de l'érosion des versants	15
1.2.2 Le régime torrentiel: définition et caractérisation	16
1.2.3 Typologie des transports solides dans le chenal d'écoulement	16
1.2.4 La modélisation , outils d'étude du transport solide	19
CHAPITRE II	25
LE MILIEU NATUREL: UN BASSIN VERSANT AUX FORTS CONTRASTES.	
2.1 Les Andes Vénézuéliennes	25
2.1.1 Structure de la chaîne des Andes au Venezuela	25
2.1.2 Morphologie et lithologie	26
2.1.3 Le bassin versant du Río Boconó: exemple d'un bassin montagnard des Andes vénézuéliennes	26
2.2 Géomorphologie et lithologie	26
2.2.1 Géomorphologie	26
2.2.2 Lithologie	29
2.2.2.1 Burate	29
2.2.2.2 Boconó	30
2.2.2.3 Guaramacal	30
2.3 Climatologie et couverture végétale	31
2.3.1 Climatologie	31
2.3.2 Couverture et occupation du sol	32
2.3.2.1 Couverture Végétal	33
2.3.2.2 Occupation du sol par l'agriculture	34
2.4 Le réseau hydrologique	34
2.4.1 Hypsométrie comparée des différentes branches et affluents	34
2.4.2 Le sous bassin du Boconó avant sa confluence	36
2.4.3 Le sous bassin du Burate	37

2.4.4 Le bassin du torrent Corojó	38
2.4.5 Le petit bassin versant des Jarillos: un exemple de bassin versant sur lutite pyriteuse	39
2.4.6 Bassin versant du río Anús et autres affluents dans le massif de Guaramacal	40
2.4.7 Le barrage de Peña Larga: exutoire actuel de la partie montagnarde du Río Boconó.	41
2.5 Synthèse des connaissances hydrologiques sur le bassin versant du Boconó	41
2.5.1 Typologie des crues du Boconó	42
2.5.2 Synthèse des acquis sur le transport de MES	43
2.6 Synthèse sur le milieu naturel	43

CHAPITRE III

METHODOLOGIE D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNEES MISE AU POINT METHODOLOGIQUE ET VERIFICATION DE LA QUALITE DES DONNEES

3.1 La démarche d'acquisition des données	45
3.2 Les campagnes de terrain	45
3.2.1 Cartographie et stratégie de prélèvements spatialisés	45
3.2.2 Localisation des mesures et prélèvements temporels	47
3.2.3 Description sommaire des épisodes pluvieux étudiés	50
3.3 Description de la métrologie	53
3.3.1 Mesures de terrain	53
3.3.2 Mesures de laboratoire	53
3.4 Les modèles utilisés pour le traitement des données	54
3.4.1. Modèles géostatistiques	54
3.4.2 Outils statistiques	54
3.4.3. Modèle thermodynamique d'interprétation et de simulation des processus chimiques	54
3.4.4. Modèle hydrologique de surface	56
3.5 Mise au point méthodologique et vérification de la qualité des données	57
3.5.1 Calibration des relations débit/hauteur	57
3.5.2 Représentativité des prélèvements locaux dans la section du torrent	58
3.5.3 Répétabilité des mesures	59
3.6 Conclusion sur le protocole expérimental	60

CHAPITRE IV

SPATIALISATION DES CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES: DEFINITION DES UNITES HYDROLOGIQUES, CARACTERISATION DE LEURS SIGNATURES, IDENTIFICATION DES MARQUEURS ET DES TRACEURS.

4.1 Cartographie des caractéristiques chimiques et isotopiques des éléments dissous	61
4.1.1 Critères de choix des paramètres	61
4.1.2 Le couple Na/Cl	62
4.1.3 Le triplet: nitrate, potassium et phosphate	62
4.1.4 Les Nitrites et la fugacité du gaz carbonique:	63
4.1.5 L'alcalinité carbonatée	63
4.1.6 Le groupe de la conductivité électrique, le sulfate, le calcium,	

le pH, l'aluminium et le magnésium	65
4.1.7 ^{18}O des pluies et des cours d'eau	66
4.1.8 Caractérisation de la matière organique: le taux de C.O.P., le rapport C/N et le $\delta^{13}\text{C}$	66
4.2 Etude et simulation des processus d'acquisition des signatures chimiques et isotopiques.	68
4.2.1 Etude des équilibres entre solution et minéraux	68
4.2.2 Altération des roches cristallines et alcalinisation	69
4.2.3 Oxydation de la pyrite et acidification	71
4.2.3.1 Etude des équilibres solutions minéraux et caractérisation chimique fine des eaux acides	71
4.2.3.2 Simulation de l'oxydation de la pyrite	71
4.2.4 Simulation de la réduction des eaux interstitielles des sédiments du barrage	73
4.2.5 Mécanismes responsables de la distribution de ^{18}O dans les pluies	76
4.2.6 Mécanismes de distribution de carbone organique	77
4.3 Synthèse sur les ensembles géographiques et leur signatures.	78
4.3.1 La zone cristalline: los páramos (ZC)	79
4.3.2 La haute vallée de Boconó ou vallée de río Negro	79
4.3.3 Le sous-bassin San Miguel	79
4.3.4 Les zones de moyenne et basse montagne (MY)	79
4.3.5 Le secteur Vitisay: exemple des eaux acides (VIT)	79
4.3.6 Le versant nord-est Guaramacal (GU)	80
4.3.7 Le bassin du río Anús	80
4.3.8 Zone de sédimentation du barrage (EX)	80
4.4 Typologie des traceurs et marqueurs	80
4.5 Conclusion du chapitre	82

CHAPITRE V

ÉTUDE DES MÉCANISMES DE TRANSFERT D'EAU, ÉLÉMENTS DISSOUS ET PARTICULAIRE LORS DE CRUES DE DEUX TORRENTS.	83
5.1 Etude d'une petite crue dans un petit bassin versant: Los Jarillos	83
5.1.1 Les variations limnigraphiques	83
5.1.2 Evolution temporelle de la chimie des éléments dissous	84
5.1.3 Caractérisation et transfert des matières en suspension dans le torrent Los Jarillos	88
5.1.4 Conclusion et synthèse sur la petite crue des Jarillos.	92
5.2 Etude d'une crue dans un torrent caractéristique de la zone du Guaramacal: la quebrada Corojó	92
5.2.1 Etude du limnigramme et description des observations	93
5.2.2 Caractérisation hydrochimique des affluents de Corojó: La Suerita et Corojó	93
5.2.3 Evolution des éléments dissous lors de la crue	94
5.2.4 Evolution des phases solides: le taux de matière en suspension (M.E.S.), la granulométrie et le carbone organique particulaire (C.O.P.)	100
5.3 Conclusion du chapitre	105

CHAPITRE VI

ETUDE DES MECANISMES ET TRANSFERTS DANS LES BRANCHES BOCONO ET BURATE: BILANS D'EXPORTATION DES MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES	107
6.1 Etude d'une crue moyenne du río Burate: la crue de 9-10 juillet 1995	107
6.1.1 Etude de l'hydrogramme	107
6.1.2 Evolution des éléments dissous: caractérisation géochimique des eaux	109
6.1.3 Le suivi et la caractérisation de matières en suspension (M.E.S.)	116
6.1.4 Synthèse et conclusion sur la crue du Burate	120
6.2 Les crues du río Boconó du 15-16 juillet 1994	121
6.2.1 Etude de l'hydrogramme	122
6.2.2 Variations des teneurs en éléments dissous	123
6.2.3 Le suivi et la caractérisation des M.E.S.	126
6.2.4 Synthèse et conclusion sur la crue du 15-16 juillet 1994 du Boconó	129
6.3 Etude du 9-10 juillet 1995 du río Boconó	130
6.3.1 Etude de l'hydrogramme	130
6.3.2 Evolution des caractéristiques physico-chimiques	131
6.3.3 Le suivi et la caractérisation des MES	137
6.4 Etude d'une crue à la confluence Boconó/Burate	140
6.4.1 Etude de l'hydrogramme	140
6.4.2 Variations temporelles des paramètres physico-chimiques de la phase aqueuse	141
6.5 Etude d'une crue à l'entrée du barrage «Peña Larga»	146
6.5.1 Etude de l'hydrogramme	146
6.5.2 Variations temporelles des éléments chimiques dissous	146
6.5.3 Le suivi et la caractérisation des MES	148
6.6 Estimation du flux moyen annuel des matières en suspension (M.E.S.)	151
6.6.1 Description de sédiments	151
6.6.2 Estimation du flux moyen annuel de MES sur la dernière décennie	151
6.6.3 Etude des profils granulométriques des sédiments du barrage et comparaison avec la granulométrie des affluents du río Boconó	153
6.6.5 Conclusion sur l'étude des sédiments du barrage	154
6.7 Simulation des transferts d'eau et de soluté dans les bassins versants des Rio Burate et Boconó: cas de la crue du 9-10 juillet 1995	154
6.7.1 Simulation Burate à trois pôles géographiques	155
6.7.2 Simulation Burate à quatre pôles géographiques	156
6.7.3 Etude de la sensibilité du modèle de transferts d'eau et de soluté	157
6.7.4 Synthèse et conclusion sur la simulation des transferts d'eau, de solutés et de matières particulaires dans le Burate.	158
6.7.5 Simulation de la crue du Boconó avec quatres pôles géographiques	159
6.7.6 Conclusion sur la modélisation des transports d'eau, de solutés et de matières en suspension dans les branches principales du réseau hydrographique.	160
6.8 Conclusion du chapitre	160

<i>CONCLUSION GENERALE</i>	163
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	167
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	177
<i>LISTE DES FIGURES</i>	179
<i>ANNEXE</i>	

ANNEXE I

ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS DU FACIES CHIMIQUE DES EAUX LORS DES CRUES ETUDIEES ET LORS DE LA CAMPAGNE SPATIALE DE PRELEVEMENTS

Le but de cette annexe est de faciliter l'étude des variations spatiales et temporelles des divers paramètres chimiques. Compte tenu du grand nombre de paramètres mesurés, il convient de réaliser une étude statistique pour définir les grands groupes d'éléments qui véhiculent de l'information, soit comme traceur soit comme marqueur.

Ceci permettra de ne retenir qu'un seul élément par groupe, par exemple celui dont la mesure est la plus précise, ce qui allège le traitement. Par ailleurs, le regroupement des paramètres peut constituer une aide pour identifier leur origine, autrement dit pour mieux définir la nature de l'information qu'ils véhiculent.

Enfin, en étudiant successivement le comportement des groupes de paramètres physico-chimiques sur des crues concernant des bassins versants différents, il est possible d'apprécier la stabilité du comportement d'un paramètre selon le type de milieu. Ainsi, il sera possible de distinguer les éléments qui ont la même origine sur tous les sous-bassins et ceux qui, à cause d'une origine parfois mixte, présentent un comportement variable selon le sous-bassin.

ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS CHIMIQUES DES EAUX DE LA CRUE DU 15-16 JUILLET 1994 DANS LA VILLE DE BOCONO.

Variations du faciès chimique

Le faciès chimique des eaux varie de façon modérée sur l'ensemble de la crue.

En terme de concentration, les variations observées sont très significatives, mais le rapport entre les ions varie de façon plus modeste.

Les calculs se réfèrent uniquement aux éléments majeurs dissous suivants: K, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, PO₄ et Alcalinité pour 59 échantillons d'eau régulièrement répartis tout au long de la crue.

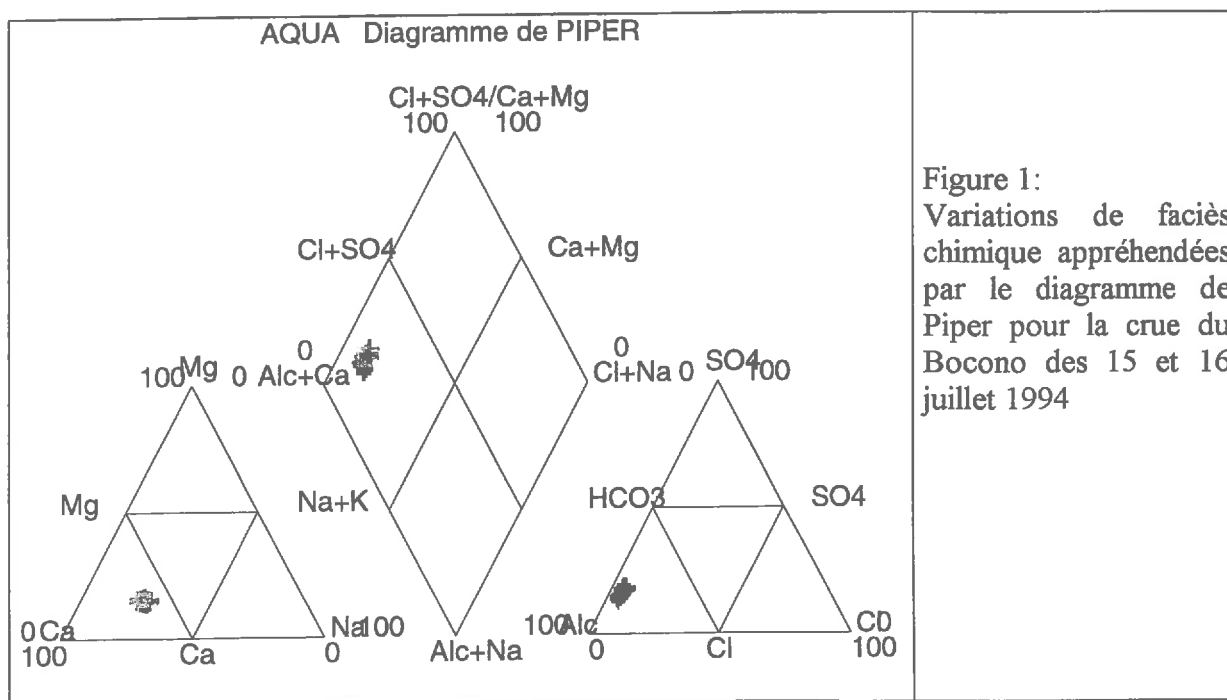


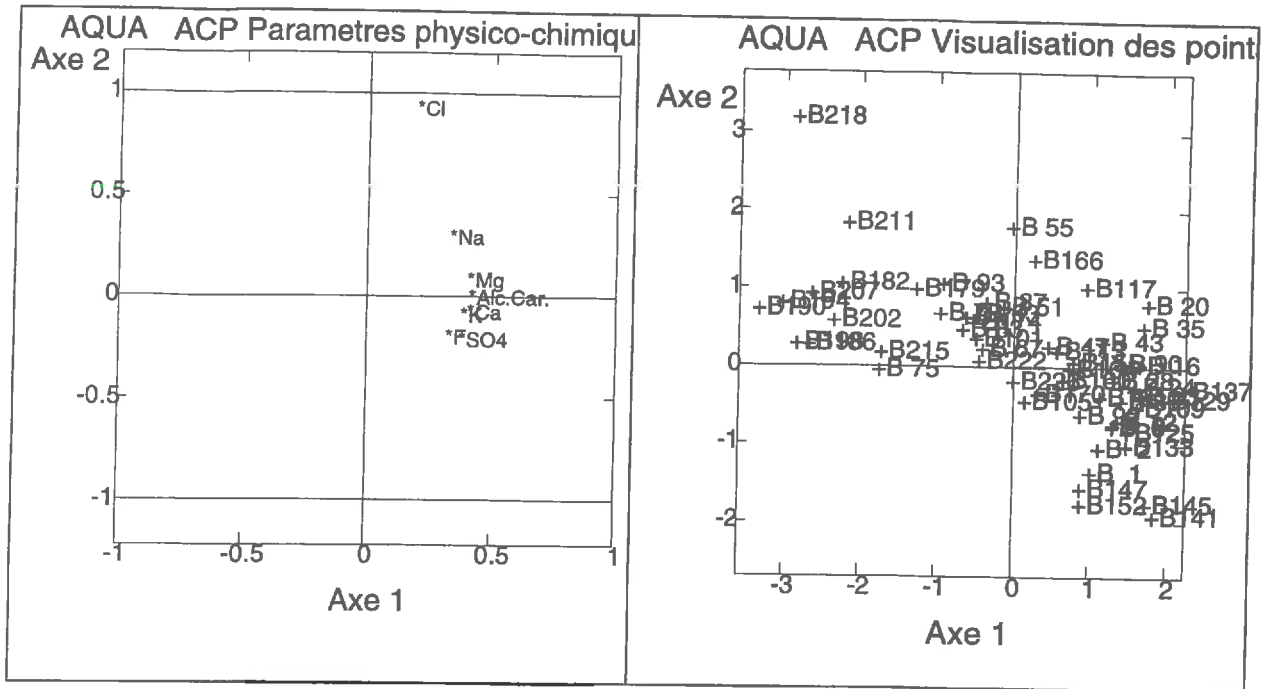
Figure 1:
Variations de faciès chimique appréhendées par le diagramme de Piper pour la crue du Bocono des 15 et 16 juillet 1994

ACP

L'ACP a été réalisée à partir de la matrice des corrélations. Cette dernière révèle l'existence de corrélations parfois marquées entre divers paramètres. Ainsi, Le groupe K/SO₄/Ca est-il bien corrélé (K/SO₄: $r = 0.917$; K/Ca: $r = 0.925$). Les MES sont corrélées avec K, Ca et SO₄ (respectivement $r = 0.895$, $r = 0.817$ et $r = 0.884$). Le chlorure est mal corrélé à tous les autres paramètres sauf Na ($r = 0.43$). La conductivité électrique est fortement corrélée au premier groupe.

Les grands groupes d'éléments sont Alcalinité/Ca/Mg/K dont le comportement est proche de PO₄/SO₄. Na et Cl se distinguent du reste des paramètres, et plus particulièrement Cl. Na possède une position intermédiaire entre Les autres paramètres et Cl.

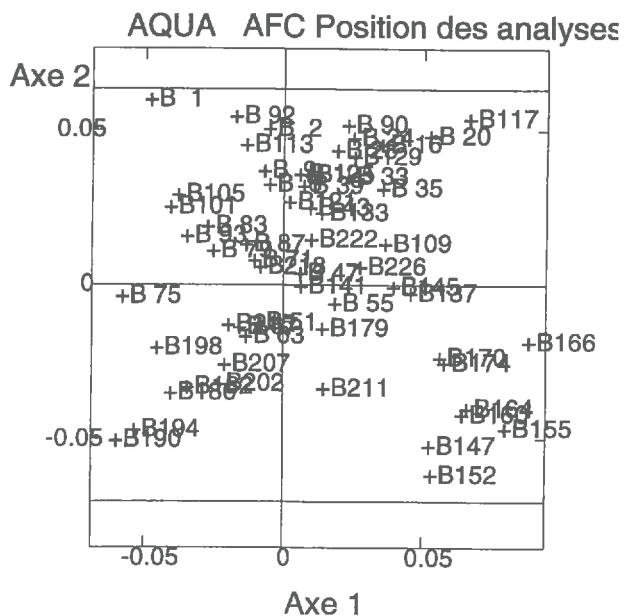
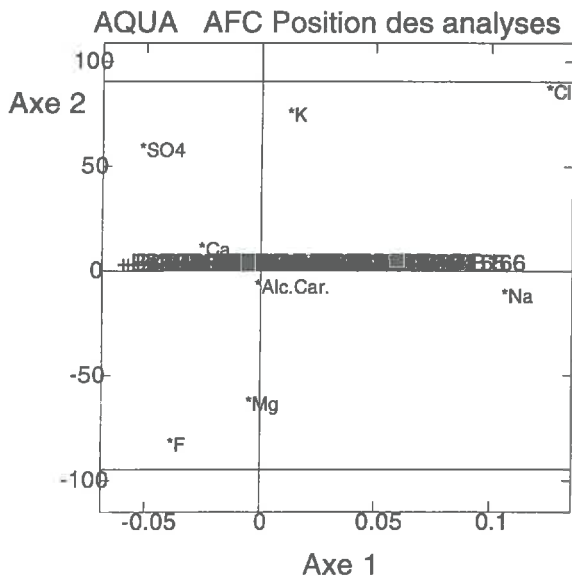
Le premier plan factoriel représente un total de $73.78 + 11.32$ soient 85% de la variance. La distribution des échantillons dans ce premier plan factoriel montre des variations complexes entre de nombreux pôles. Le nombre de ces derniers est supérieur à deux.



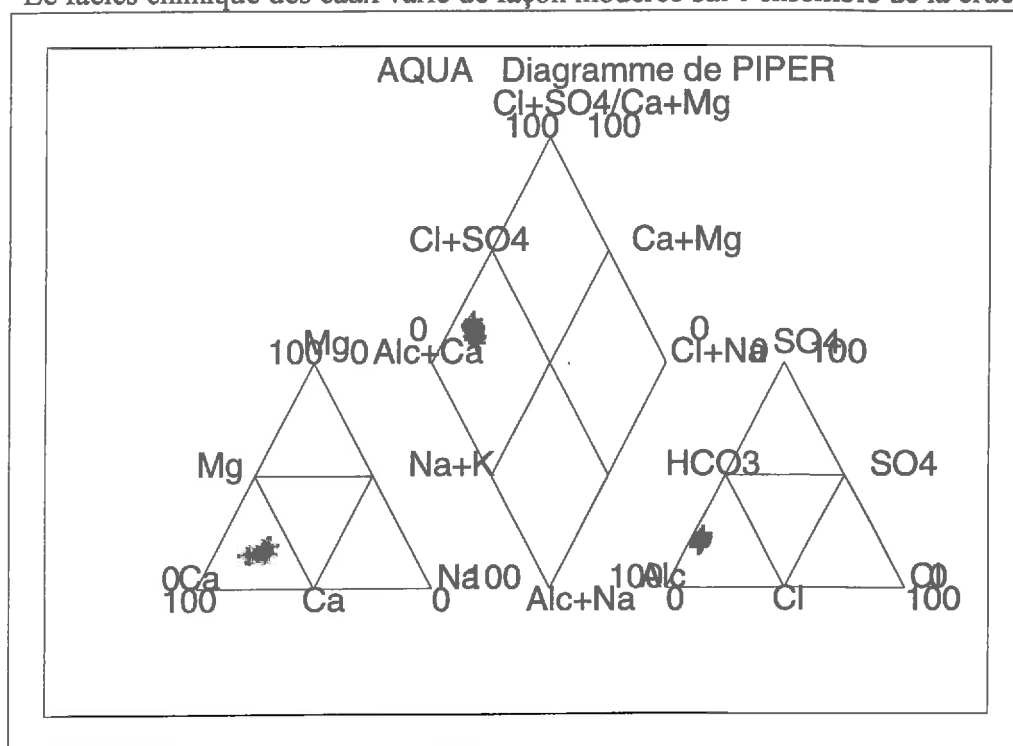
AFC:

Le premier plan factoriel de l'AFC représente 41.58+32.30 soient 73.88 % de la variance. Les paramètres physico-chimiques se regroupent selon un schémas proche de celui observé pour l'ACP. Na et surtout Cl ont un comportement singulier, alors que les autres éléments se regroupent entre Alcalinité/Ca/Mg et SO4/K.

Les points représentatifs des analyses évoluent entre les pôles suivants: Na/Cl opposé à Mg/ PO4 et SO4 légèrement opposé à alcalinité/Ca.



BOCONO AVANT CONFLUENCE; CRUE DU 9-10 JUILLET 1995
 ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS DE COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX
 Le faciès chimique des eaux varie de façon modérée sur l'ensemble de la crue.



En terme de concentration, les variations observées sont très significatives, mais le rapport entre les ions varie de façon plus modeste.

Les calculs se réfèrent uniquement aux éléments majeurs dissous suivants: K, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃ et Alcalinité pour 44 échantillons d'eau régulièrement répartis tout au long de la crue.

Il convient de remarquer que MES et K sont fortement corrélés ($r=0.973$) et dans une moindre mesure MES et Phosphates ($r=0.508$); En revanche le taux de MES est négativement corrélé à Cl et Na (respectivement $r=-0.539$ et -0.434)

ACP:

L'Analyse en Composantes Principales présente un premier plan factoriel avec des axes représentant respectivement 51.9 et 31.4% de la variance. Trois groupes de paramètres s'individualisent: Ca/SO₄/Alcalinité, Na/Cl, et K/NO₃ (corrélés à MES et K).

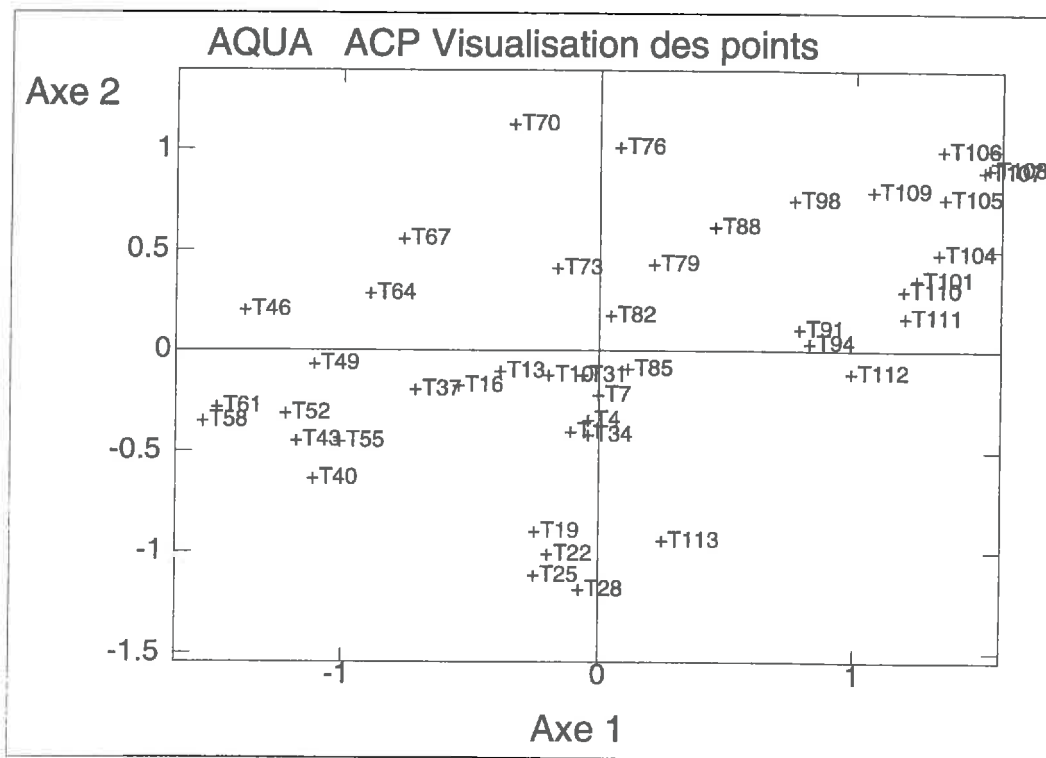
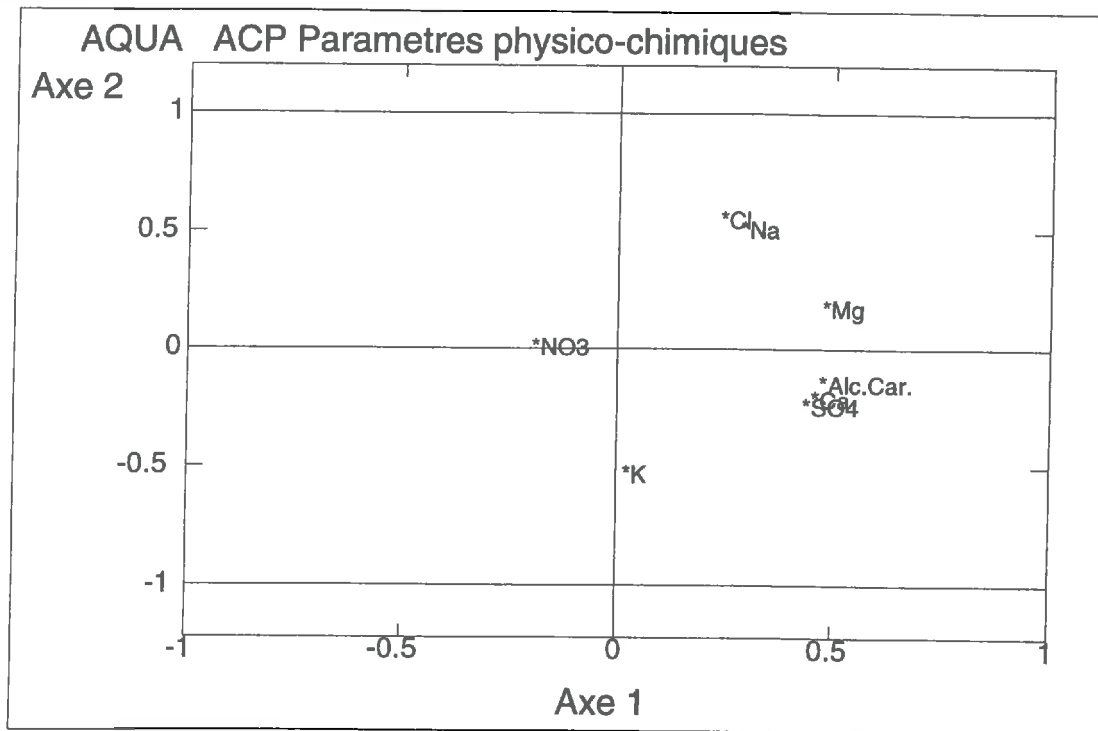
-Ca-SO₄-Alcalinité s'oppose à K/NO₃ sur le premier axe. Ce dernier semble donc séparer les éléments d'origine superficielle NO₃ et K, qui sont corrélés au taux de MES, aux éléments d'origine plus profonde de différents sous-bassins: Ca, SO₄ et Alcalinité.

La corrélation légèrement marquée entre les Phosphates et NO₃/K suggère que ces éléments superficiels sont liés à l'activité biologique; en effet, N/P/K constituent les éléments majeurs de l'alimentation minérale des plantes. Il conviendra ainsi de déterminer s'ils proviennent de la minéralisation de la matière organique, des pluviollessivats ou s'il doivent être associés à une fertilisation locale par exemple des zones caféières.

- K/NO₃ s'oppose à Na/Cl sur le second axe. Il semble s'agir d'une opposition au niveau des eaux de surface entre l'origine atmosphérique de Na/Cl et l'origine surface du sol de K/NO₃(/MES).

Le Magnésium présente un comportement intermédiaire.

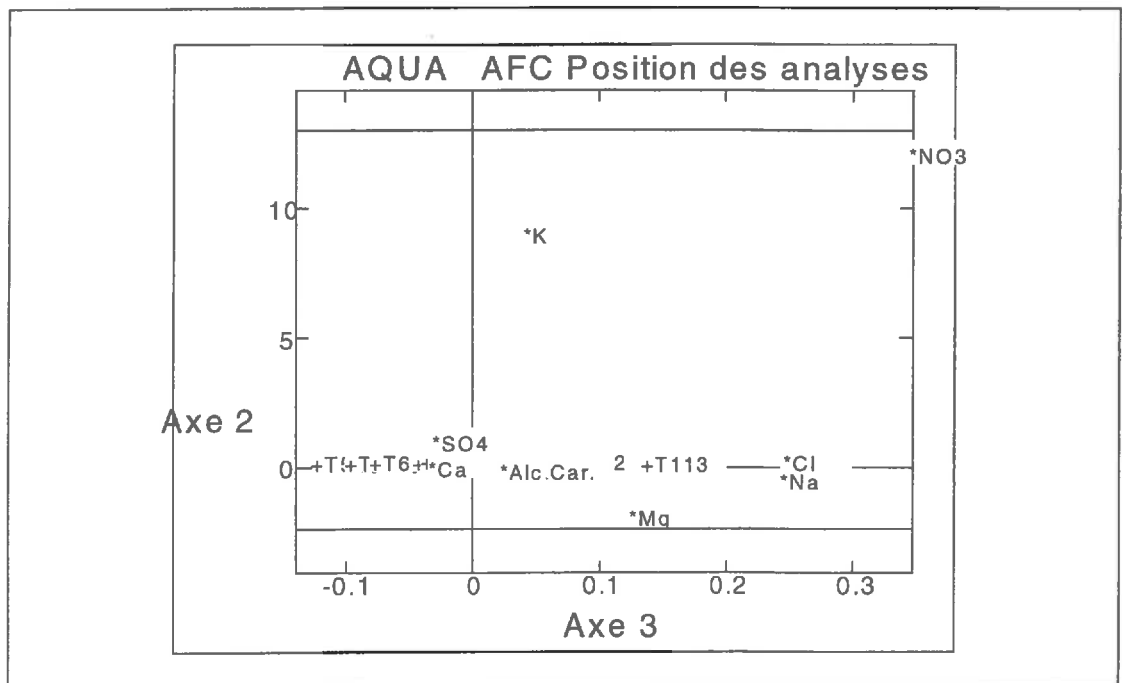
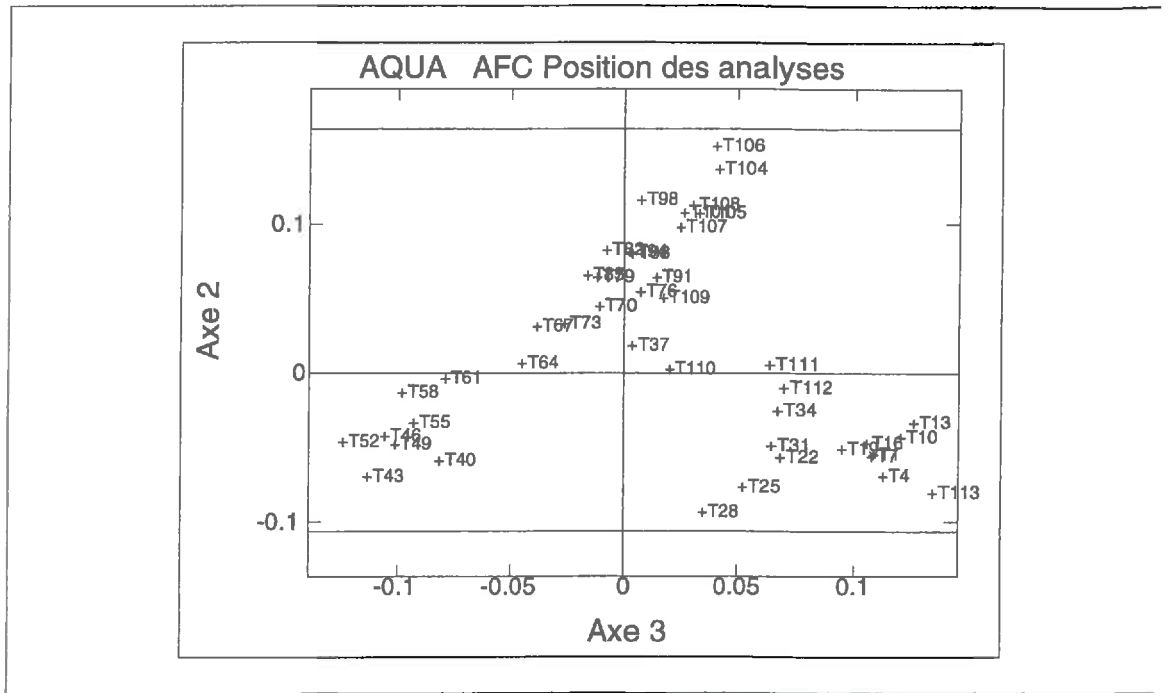
Le cheminement temporel des points dans ce plan factoriel montre une évolution entre au moins trois pôles. L'état final, représenté par l'échantillon T113, est très proche de l'état initial, point T1, ce qui traduit que pour l'ensemble des paramètres le faciès chimique des eaux du rio Bocono retrouvent après la crue une composition chimique voisine de celle qui précédait cet événement.



AFC:

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) fournit des indications tout à fait comparables à celles de l'ACP. Le premier plan factoriel, avec 51.7 et 38.4% de variance, oppose Na/Cl à Ca/SO4/Alcalinité sur le premier axe, alors que NO3/K s'oppose aux autres

paramètres sur le second axe. Le faciès varie tout au long de la crue: le pôle initial se dirige vers Na/Cl; le début de crue (T37) est plutôt caractérisé par l'alcalinité puis les eaux se dirigent vers le pôle SO_4/Ca (T43 à 52) et ensuite vers un pôle K/ NO_3 (T98à106) pour revenir au voisinage de l'état initial en fin de crue (T111 à 113).



Conclusion sur l'étude statistique des variations de composition chimique des éléments dissous:

La crue a été échantillonnée dans en entier car les caractéristiques finales de l'eau retrouvent celles de l'état initial. Il est probable aussi que la signature des réservoirs n'aie pas été affectée par la pluie car sinon une variation de signature se traduirait par une différence entre état initial et état final des caractéristiques au point de mesure.

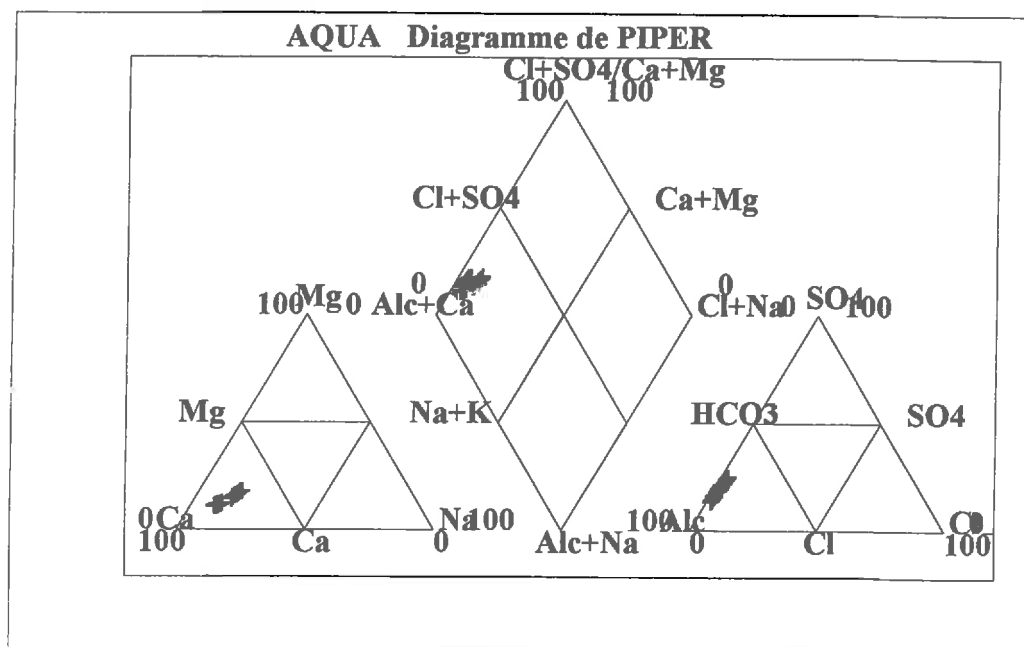
Les paramètres physico-chimiques montrent des groupes: Na et Cl semblent marquer l'eau de pluie moyenne régionale ou celle de l'événement, NO₃ et K marquent les eaux de surface, probablement un ruissellement ou ruissellement hypodermique de zone à forte activité biologique (zone de forêt). Ca, SO₄ et l'alcalinité semblent marquer plutôt une origine plus profonde, comme une eau de sol, avec une distinction entre un pôle carbonaté probablement lié aux zones cristallines et un pôle sulfaté probablement lié à des zones moins métamorphisées voisines du point de mesure.

L'alimentation de base est constituée d'eau douce alcaline.

BURATE AVANT CONFLUENCE; CRUE DU 9-10 JUILLET 1995

ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS DE COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX

Le faciès chimique des eaux varie de façon modérée sur l'ensemble de la crue. Cependant, en terme de faciès, ces variations semblent plus importantes que pour le rio Bocono.



En terme de concentration, les variations observées sont très significatives puisqu'elles présentent un facteur supérieur à 2.

Les calculs suivants se réfèrent uniquement aux éléments majeurs dissous suivants: K, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, Phosphates et Alcalinité pour 53 échantillons d'eau régulièrement répartis tout au long de la crue. Les teneurs en nitrates étant nulles lors de l'arrivée des échantillons au laboratoire, cet élément n'a pas été pris en compte.

Il convient de remarquer que MES et K sont fortement corrélés, mais moins que pour le rio Bocono ($r=0.973$). Les MES sont relativement bien corrélées avec Ca, l'alcalinité et SO₄ (respectivement $r=0.941$; $r=0.920$ et $r=0.849$); En revanche comme pour le rio Bocono, le taux de MES est négativement corrélé à Cl et Na (respectivement $r=-0.534$ et -0.266).

ACP:

L'Analyse en Composantes Principales présente un premier plan factoriel avec des axes représentant respectivement 58.0 et 35.3% de la variance. Trois groupes de paramètres s'individualisent: K/Ca/Alcalinité, Na/Cl et Mg/SO₄.

Le premier axe discrétise Na/Cl à K/Alcalinité/Ca. Mg/SO₄ sont isolés en position intermédiaire. Il traduit la composante des eaux acides riches en sulfate, provenant d'acide sulfurique, et en magnésium (voir chapitre spatialisation des caractéristiques géochimiques).

Le second axe oppose K/Ca/Alcalinité aux autres paramètres.

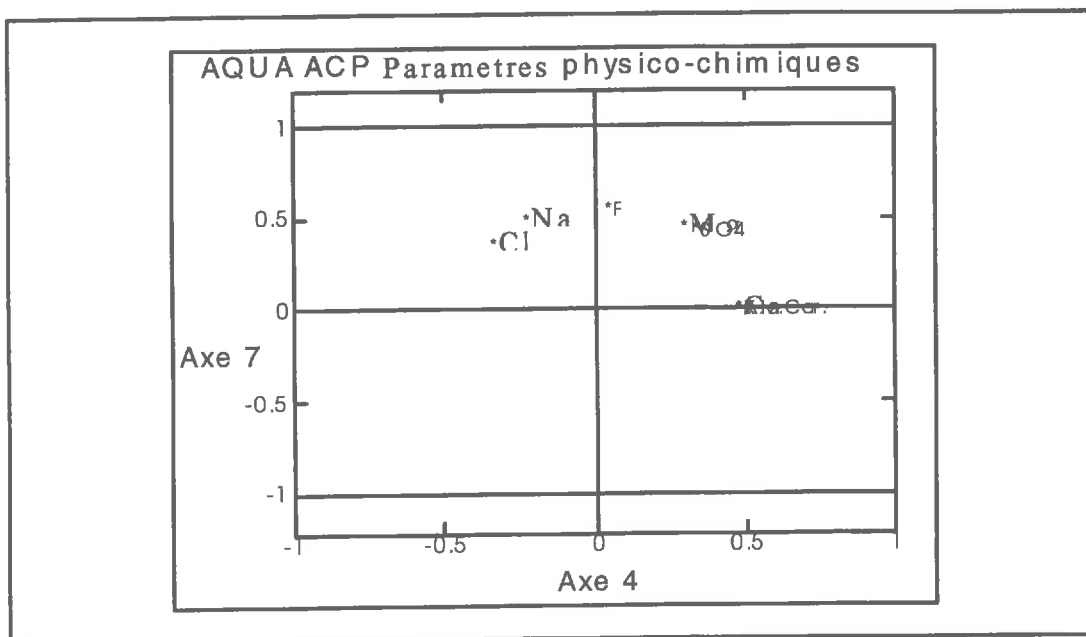
Comme pour le rio Bocono, l'évolution des caractéristiques chimiques dans le plan factoriel principal se caractérise par les deux points suivants:

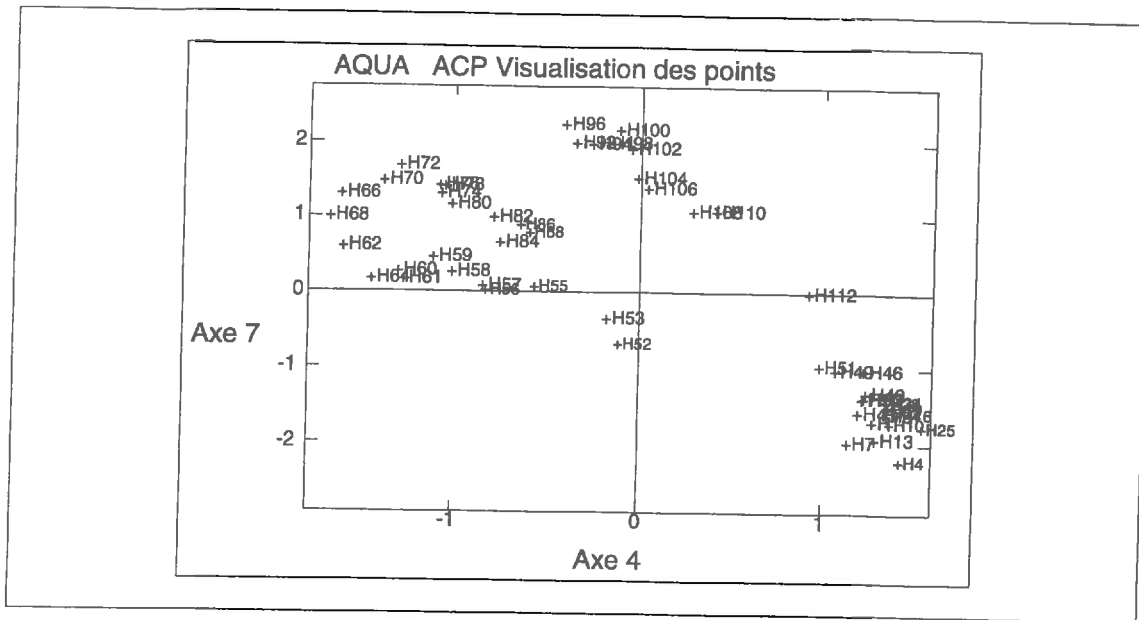
- l'évolution ne peut se résumer en un mélange entre deux pôles; l'opposition habituelle eau ancienne/eau nouvelle est trop réductrice dans ce cas. Il est indispensable de prendre en compte au minimum trois pôles.

- l'état final représenté par l'échantillon H112, est très proche de l'état initial (points H1 à H40), ce qui traduit que pour l'ensemble des paramètres le faciès chimique des eaux du rio Burate retrouvent après la crue une composition chimique voisine de celle qui précédait cet événement.

Il convient de remarquer les différences de signification des paramètres entre Bocono et Burate. Le cas du doublet sulfate/alcalinité est très significatif. Ces deux éléments sont fortement associés pour le rio Bocono, traduisant un pôle sédimentaire neutre, alors qu'ils sont opposés entre eux pour le Burate, marquant alors l'opposition d'origine des eaux entre les eaux sulfatées acides du secteur Vitissay avec le secteur cristallin d'altitude.

Ainsi, cette première approche statistique montre qu'il faut se garder d'une interprétation passe-partout des signatures chimiques.





AFC:

Le premier plan factoriel présente 99 % de la variance. Le premier axe (91%) oppose un pôle K/Ca/alkalinité au groupe Na/Cl/Phosphate. Le sulfate se situe en position intermédiaire.

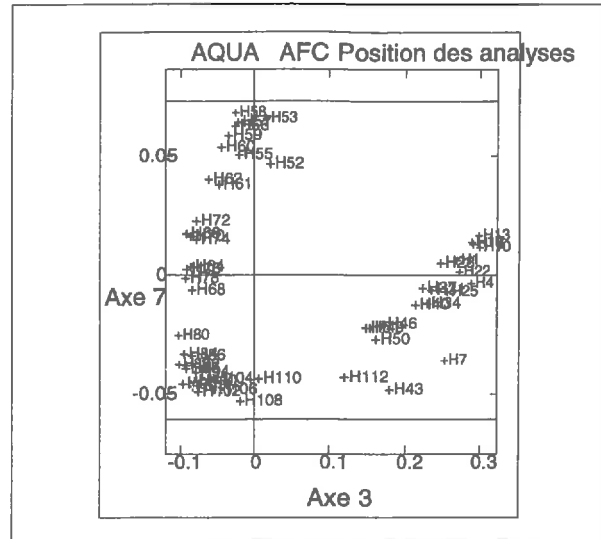
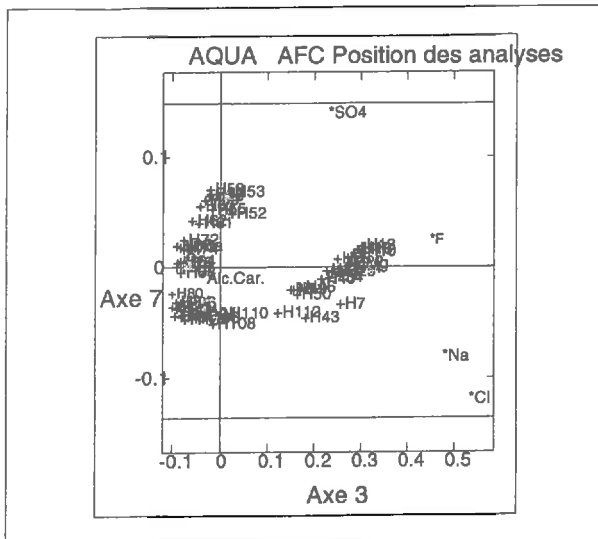
Le second axe (7.9%), oppose Na et Cl à SO₄.

La crue dessine un nuage en deux parties bien distinctes. Le faciès initial est mixte mais plutôt marqué par un pôle alcalin magnésien-calco-sodique, accessoirement chloruré sodique. Pendant une première étape (de H4 à H50), les eaux évoluent vers le pôle alcalin calco-sodique.

Avec l'arrivée brutale de la crue, le faciès change brusquement selon un pôle sulfaté.

En décrue une première évolution rapproche les eaux d'un pôle alcalin potassocalcique (H53 à H90) puis ultérieurement le faciès se rapproche de l'état initial (de H90 à H112), se rapprochant aussi du pôle chloruré sodique. Le point suivant, H113, non représenté sur cette figure se situe au voisinage immédiat de H4.

Ainsi, comme pour le rio Bocono, les caractéristiques initiales et finales sont comparables pour les éléments dissous et l'alimentation de base est constituée d'eau douce alcaline.



Conclusion sur l'étude statistique des variations de composition chimique des éléments dissous dans les eaux du rio Burate

Les concentrations moyennes en éléments dissous dans les eaux du Burate sont nettement différentes de celles du rio Bocono.

Cependant, pour le Burate, de nombreux points rappellent les résultats obtenus sur le rio Bocono:

La crue a été échantillonnée dans en entier car les caractéristiques finales de l'eau retrouvent celles de l'état initial. Il est probable aussi que la signature des réservoirs n'aie pas été affectée par la pluie car sinon une variation de signature se traduirait par une différence entre état initial et état final des caractéristiques au point de mesure.

Les paramètres physico-chimiques montrent des groupes: Na et Cl semblent marquer l'eau de pluie moyenne régionale ou celle de l'événement, K/Ca et l'alcalinité marquent les eaux de surface, probablement un ruissellement ou ruissellement hypodermique. Mg, SO4 semblent marquer plutôt une origine plus profonde, comme une eau de sol. Le comportement du sodium est cependant plus proche de celui des autres marqueurs que ne l'est le chlorure.

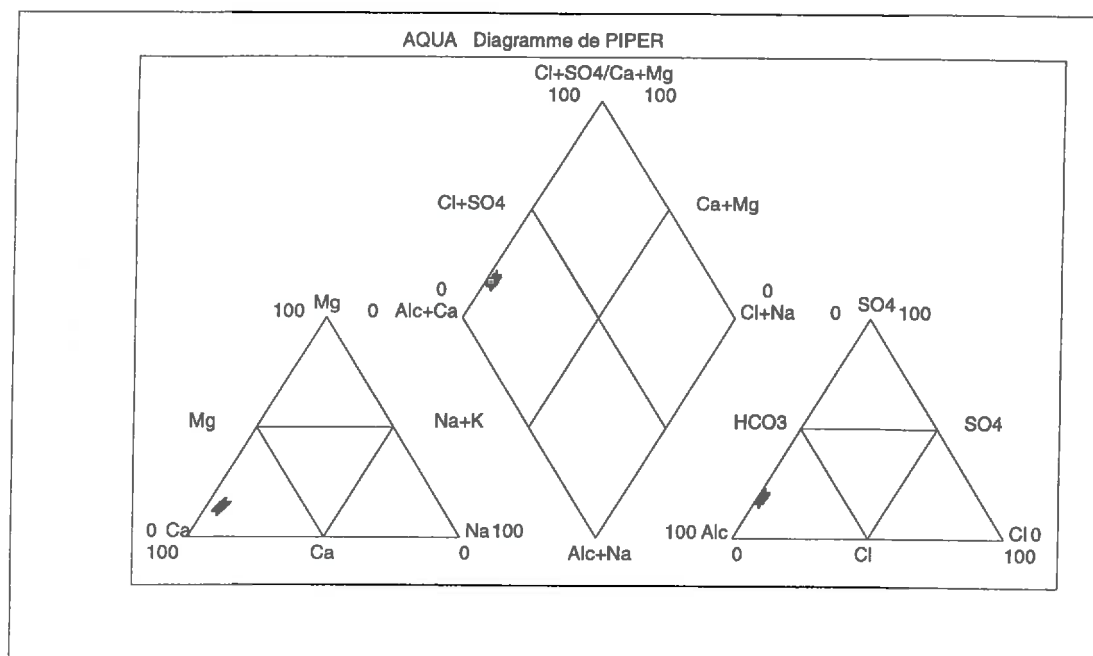
L'alimentation de base est constituée d'eau douce alcaline comme dans le cas du rio Bocono.

COROJO AVANT CONFLUENCE; CRUE DU 9-10 JUILLET 1995

ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS DE COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX

Comme pour les rios Burate et Bocono, le faciès chimique des eaux du torrent Corojo varie peu durant la crue. Cependant, quelques différences apparaissent par rapport au Burate. Le faciès chimique est plus stable dans le temps pour la quebrada Corojo; ceci s'explique en partie par l'amplitude plus faible des variations de teneur durant la crue. Elles sont inférieures à celles du Burate.

De même le faciès des eaux du torrent Corojo est plus éloigné des pôles chlorurés et sodiques que dans le cas du Burate.



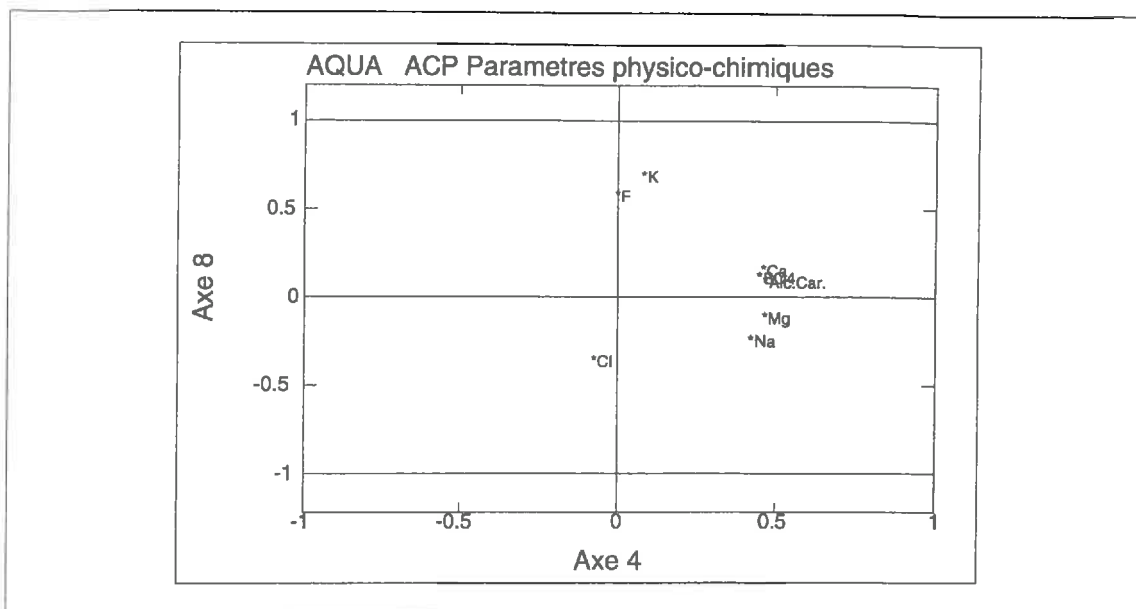
Les calculs statistiques ont été réalisés sur 75 points régulièrement répartis tout au long de la crue. Pour faciliter les comparaisons, les éléments considérés sont les mêmes que pour le Burate (K, Na, Ca, Mg, Cl, SO4, Alcalinité et PO4).

L'étude préalable des corrélations montre que le taux de MES est corrélé à K, PO4 et NO3 (respectivement $r=0.658$, 0.564 et 0.402) qui marquent donc les eaux de ruissellement de surface et négativement corrélés à Na et Cl (respectivement $r=-0.331$ et -0.243).

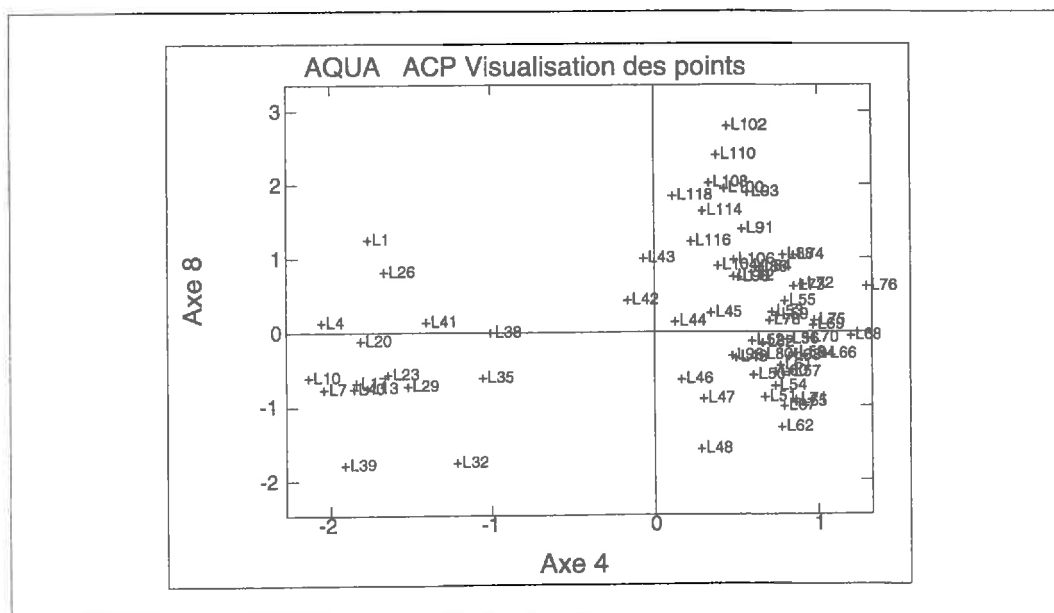
ACP:

Le premier plan factoriel présente 76.9% de la variance. Le premier axe, avec 55.6 de variance, oppose Na/Ca/Mg/alcalinité à K/Cl/PO4. La position du chlorure est surprenante. Le second axe, avec 21.3 % de variance, oppose Cl/Na à PO4 /K; les autres paramètres étant en position intermédiaire.

Ainsi, trois grands groupes d'éléments se dégagent: les éléments de ruissellement de surface, à savoir K et PO4, les marqueurs profonds Ca, SO4, Alcalinité et Mg, et enfin Na et Cl qui sont probablement marqueurs de la pluie. Le comportement de Na est cependant très proche de celui des marqueurs profonds, comme dans le cas du rio Burate.



Sur le premier plan factoriel, l'ensemble des points précédant la montée brutale des débits se détache de l'ensemble des autres échantillons de la rue. Comme pour les rios Burate et Bocono, les évolutions observées ne peuvent se résumer en une évolution entre deux pôles. Trois ou quatre pôles sont indispensables pour considérer les échantillons de crue comme un mélange.



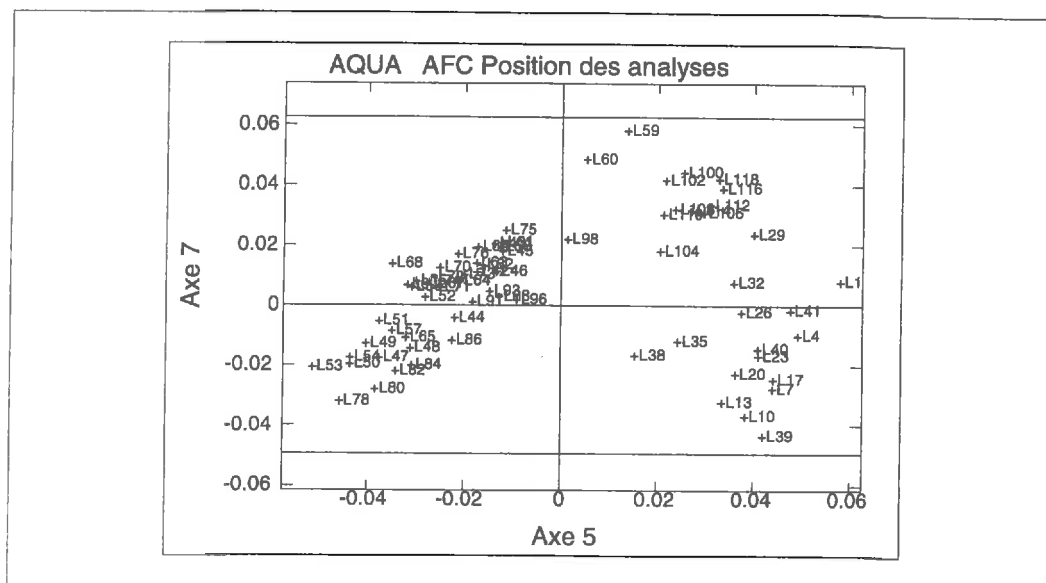
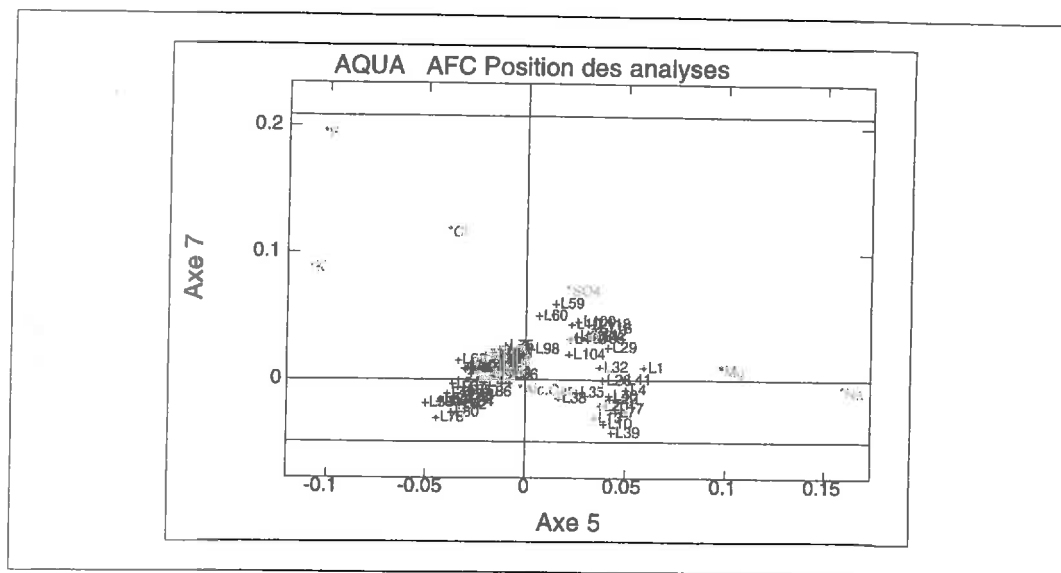
AFC:

Le premier plan factoriel de l'AFC représente plus de 87.9% de la variance.

Comme pour l'ACP, les éléments marqueurs de la surface (K/PO4 et Cl) s'opposent à ceux d'origine profonde (SO4, Alcalinité Ca et Mg). Le sodium se localise en position différente de celle du chlorure.

La distribution dans le plan montre, comme pour les deux cas précédents, que les variations ne peuvent s'expliquer en un simple mélange entre deux pôles.

Les eaux initiales sont caractérisées par le pôle carbonaté calcique-magnésien pendant la phase de montée progressive du débit. Durant cette phase, les eaux évoluent légèrement et épisodiquement vers le pôle sulfaté. Avec l'arrivée brutale de la crue, le faciès devient franchement carbonaté calcique puis sulfaté-carbonaté calcique en débit de pointe. Lors de l'épaulement visible en début de décrue sur le limnigrame, les eaux s'écartent quelque peu du faciès carbonaté calcique pour s'approcher du terme sulfaté/chloruré calco-potassique. Comme pour la montée progressive de crue on note des déplacements épisodiques vers le sulfate. En tarissement, les eaux évoluent progressivement vers leurs caractéristiques initiales.



ETUDE STATISTIQUE ET GEOCHIMIQUE DES EAUX DES JARILLOS

Les variations temporelles du faciès chimique des Jarillos, lors de la crue, sont relativement importantes (Fig. Piper). Elle concernent essentiellement les anions avec deux

pôles, le premier sulfaté et le second carbonaté. En revanche, les variations des proportions des cations sont relativement faibles. Le calcium est dominant sur l'ensemble de la crue; le sodium, moins abondant, ne voit sa proportion varier très légèrement.

En résumé, le faciès varie d'un pôle sulfaté calcique vers un pôle carbonaté-sulfaté calcique.

L'équilibre avec la calcite montre que les solutions sont situées au voisinage de l'équilibre thermodynamique avec ce minéral. Les premiers échantillons sont en outre en équilibre avec la pCO₂ atmosphérique (K1-K2). Lors de la montée de crue (K3-K4), la pCO₂ augmente suggérant la contribution d'un réservoir riche en CO₂, tel qu'un horizon de sol se développant sur matériaux sédimentaires. Cette origine ne serait pas proprement dite superficielle.

A partir de K4 et jusqu'à la fin de l'épisode, la pCO₂ diminue pour devenir inférieure à la pression atmosphérique. Ces valeurs sont typiques d'eaux profondes d'altération de roches cristallines (Confers chapitre IV).

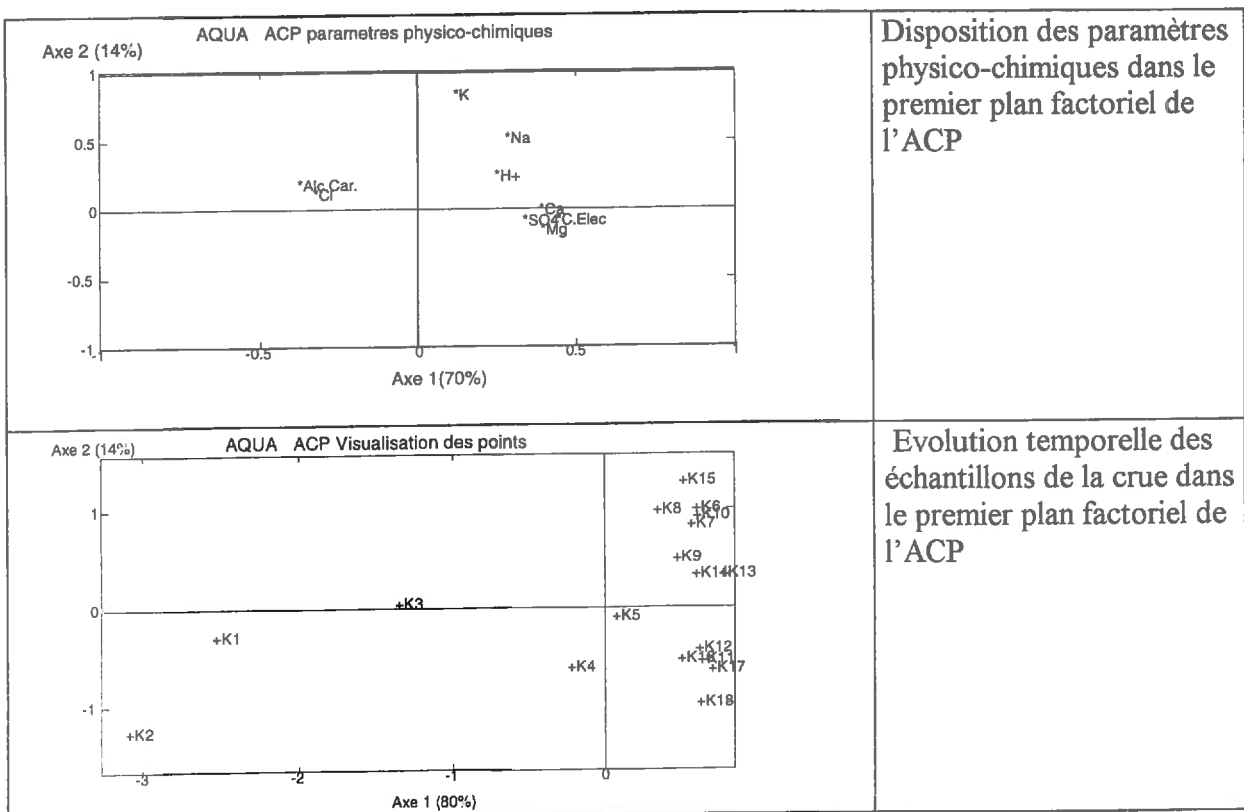
L'ACP permet de confirmer cette évolution de K1 à K4 puis de K4 vers K18.

Le premier plan factoriel montre aussi les groupes de paramètres corrélés.

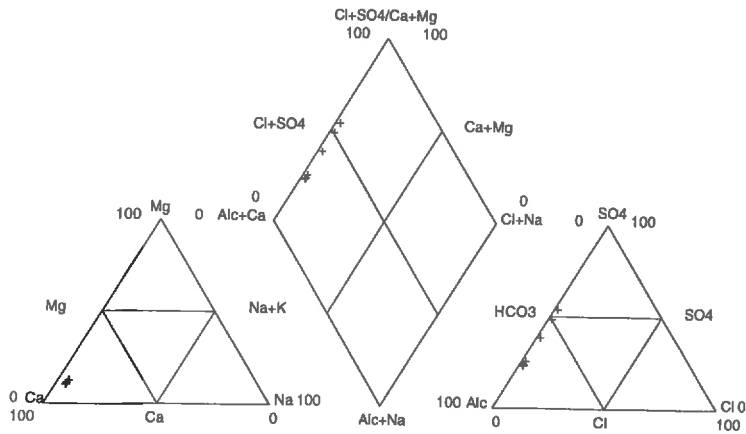
Le groupe le plus important (CE,SO₄,Ca,Mg) s'oppose à l'alcalinité et au chlorure. Il est plutôt caractéristique des eaux acides et concentrées de la partie aval du bassin versant sur laquelle les lutites pyriteuses abondent. Ces paramètres sont fortement corrélés et véhiculent donc la même information; ils sont fortement redondants et il conviendra de ne pas tous les retenir comme traceur.

Le second groupe Cl-Alcalinité est plus disparate car ces paramètres sont médiocrement corrélés. L'alcalinité caractérise plutôt les eaux alcalines diluées d'altération des roches cristallines de la partie amont du bassin. Le chlorure serait plutôt d'origine atmosphérique.

Le sodium présente une situation intermédiaire traduisant probablement une origine mixte entre la pluie et l'altération des roches cristallines et sédimentaires. Ce paramètre semble être un mauvais traceur car peu spécifique.



AQUA Diagramme de PIPER



Evolution du faciès chimique des eaux durant la crue des Jarillos (14 juillet 1995)

AQUA EQUILIBRE SOLUTION-CALCITE

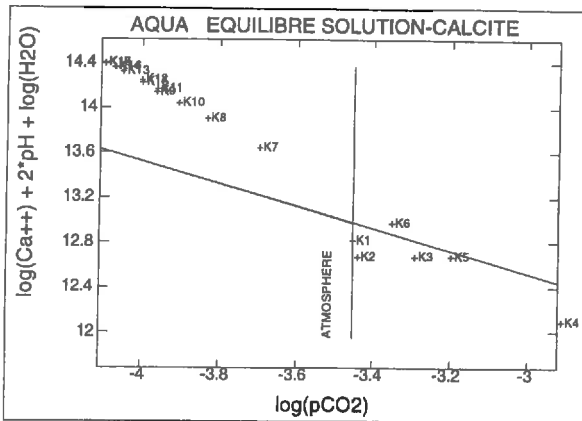


Diagramme d'équilibre des solutions avec la calcite

ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS CHIMIQUES DES EAUX DE LA CRUE DU 9-10 JUILLET 1995 A L'AVAL DE LA CONFLEUCE BOCONO/BURATE.

Variations du faciès chimique

Le faciès chimique des eaux varie de façon modérée sur l'ensemble de la crue.

En terme de concentration, les variations observées sont très significatives, mais le rapport entre les ions varie de façon plus modeste.

Les calculs se réfèrent uniquement aux éléments majeurs dissous suivants: K, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, PO₄, Alcalinité et Conductivité électrique pour 53 échantillons d'eau régulièrement répartis tout au long de la crue.

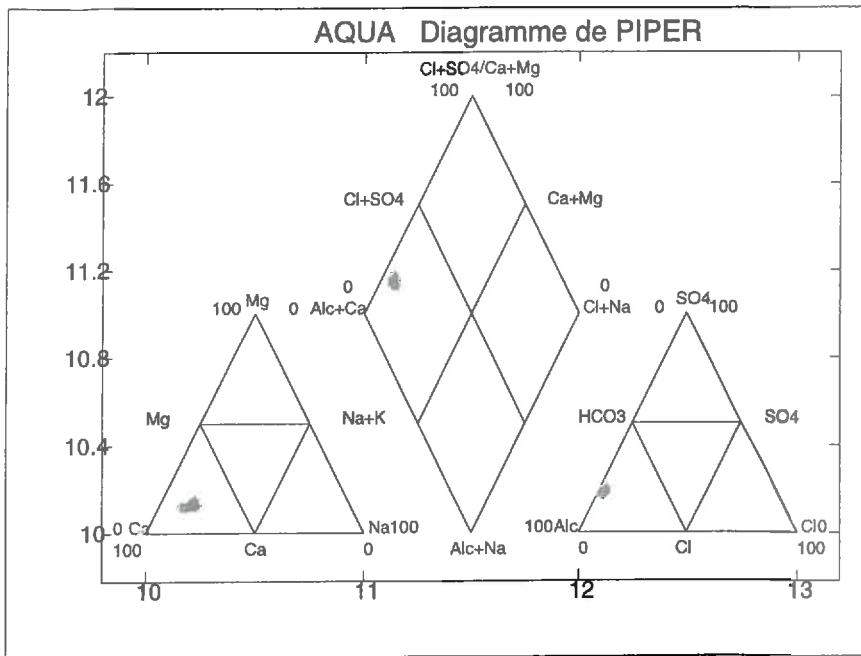
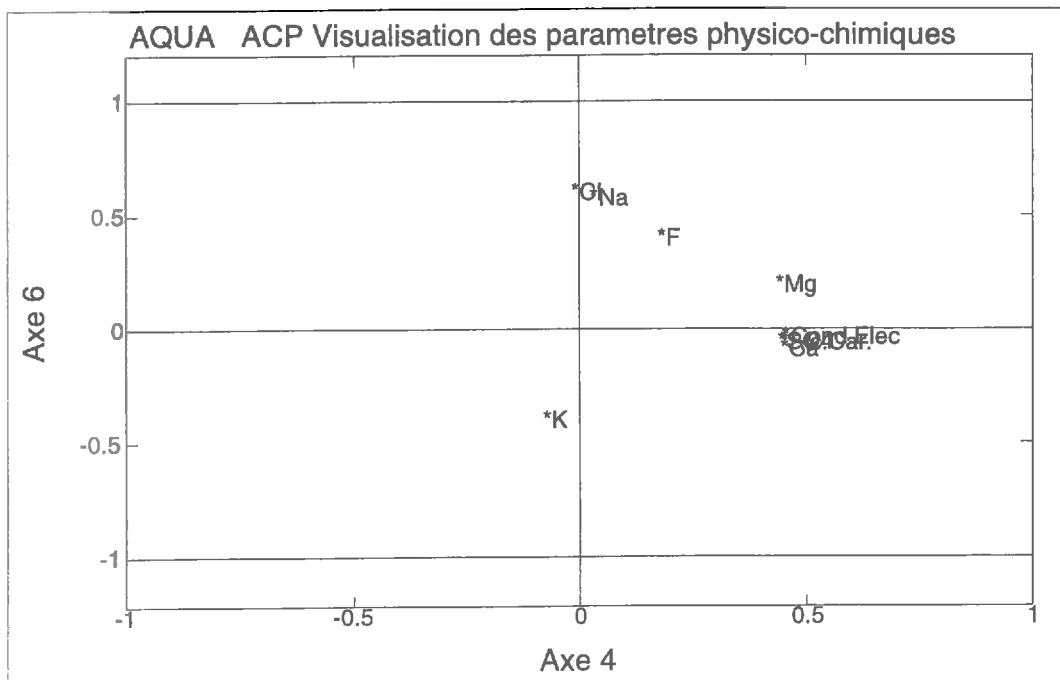


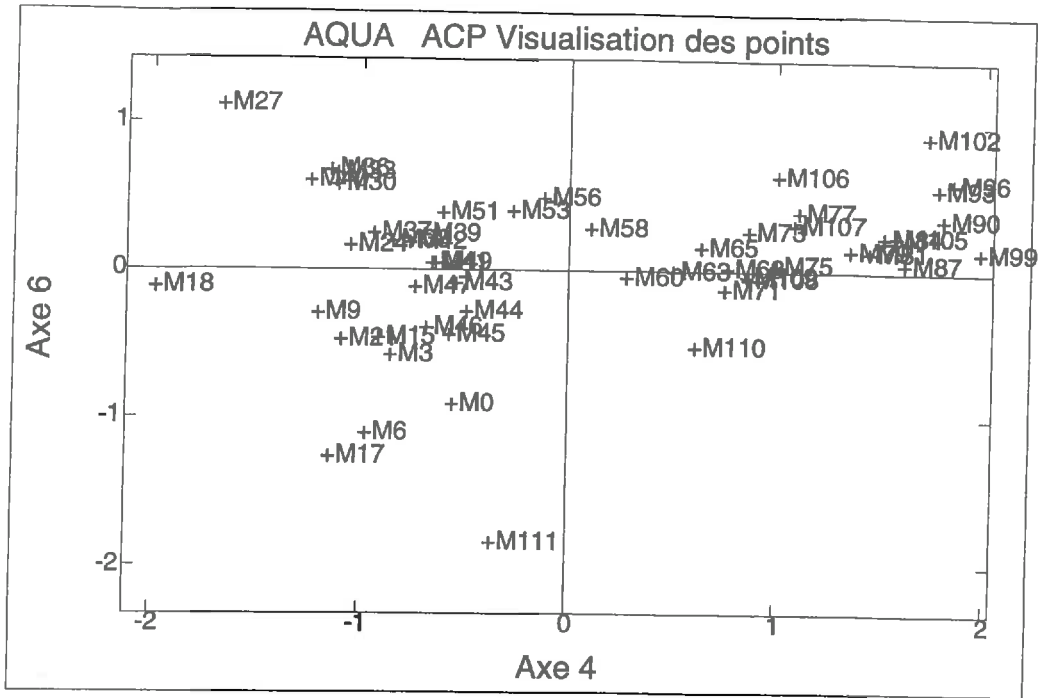
Figure XXX:
Evolution du faciès chimique pour la crue du 9-10 juillet 1995 en aval de la confluence Bocono/Burate.

ACP:

Les calculs de l'ACP réalisés sur la matrice des corrélations a fait apparaitre des groupes de paramètres très bien corrélés entre eux. Le premier constitué de SO₄/CE/Ca/Alcalinité, présente des coefficients de corrélation proches de 0,95 voire supérieurs à cette valeur. Na et Cl constituent le second groupe avec un coefficient de corrélation de 0,81.

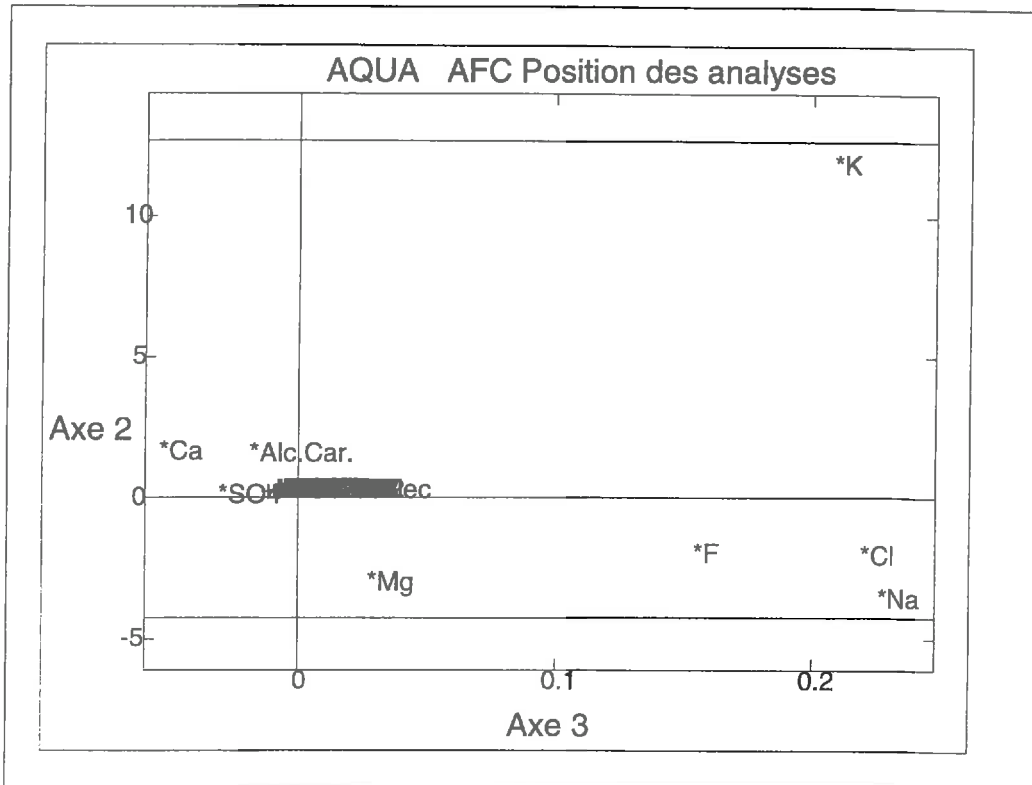
Le potassium se maintient isolé par rapport aux deux groupes précédents. Magnésium et phosphates sont intermédiaires entre les deux premeirs groupes mais en opposition à K. Le premier plan factoriel représente 54,0+29,6% de la variance.

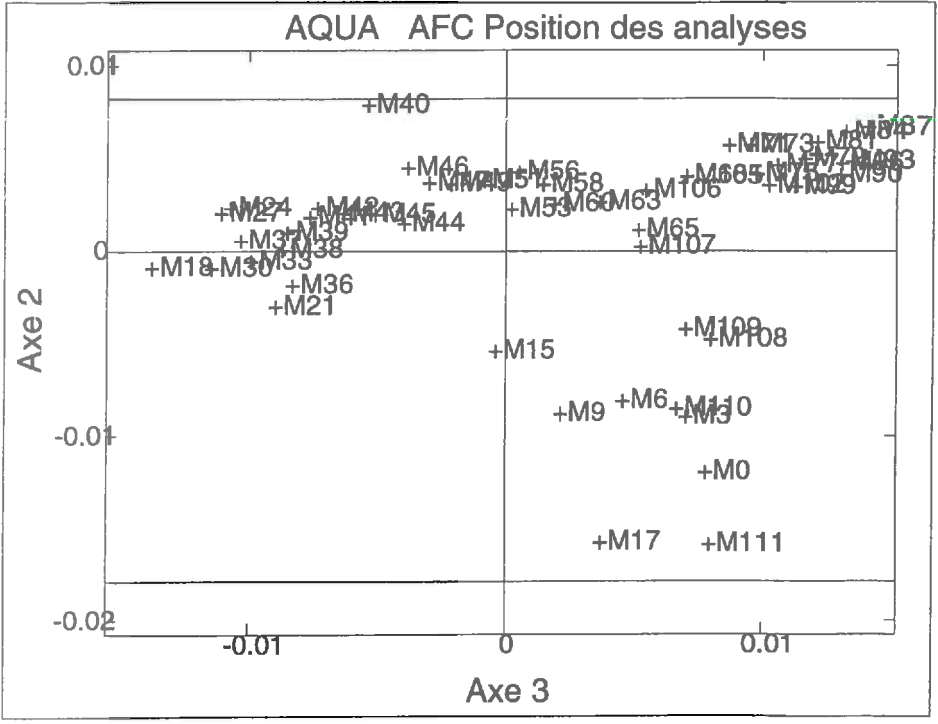




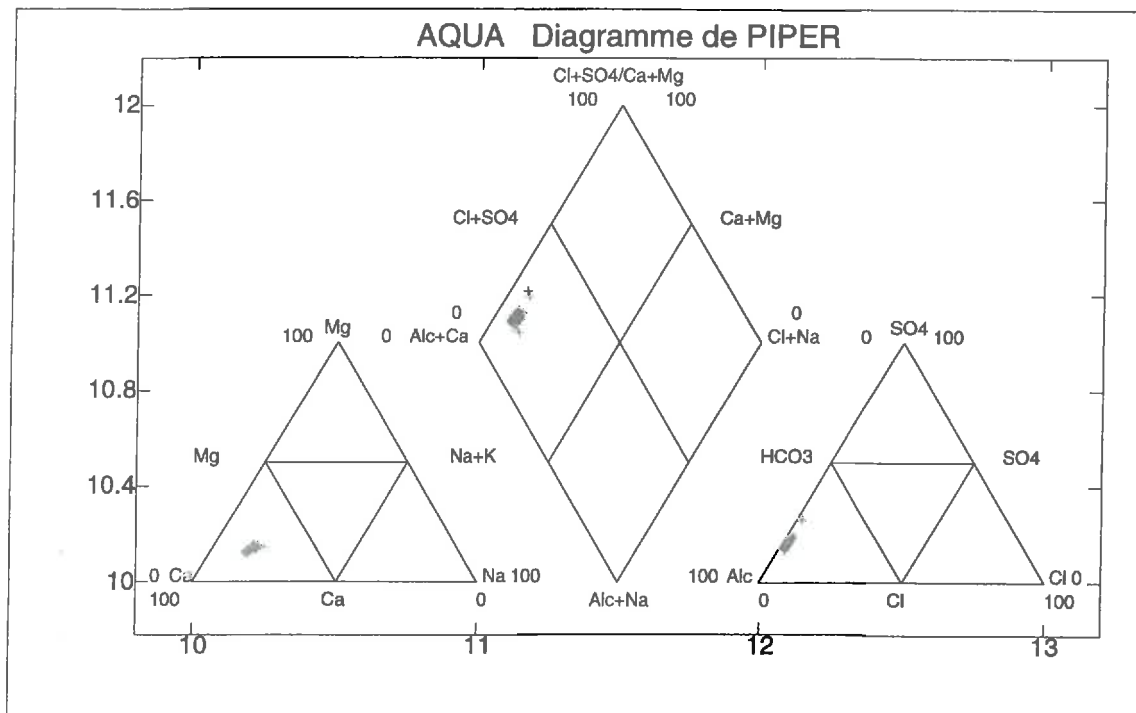
AFC:

Le premier plan factoriel de l'AFC visualise 54,3+24,9% de la variance. La distribution des paramètres physico-chimiques est comparable à celle décrite pour l'ACP.

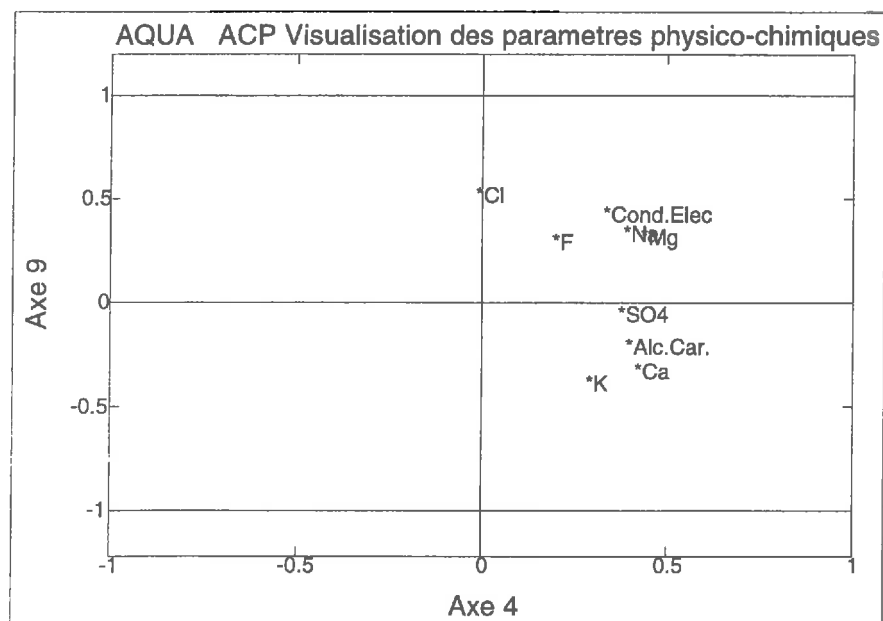


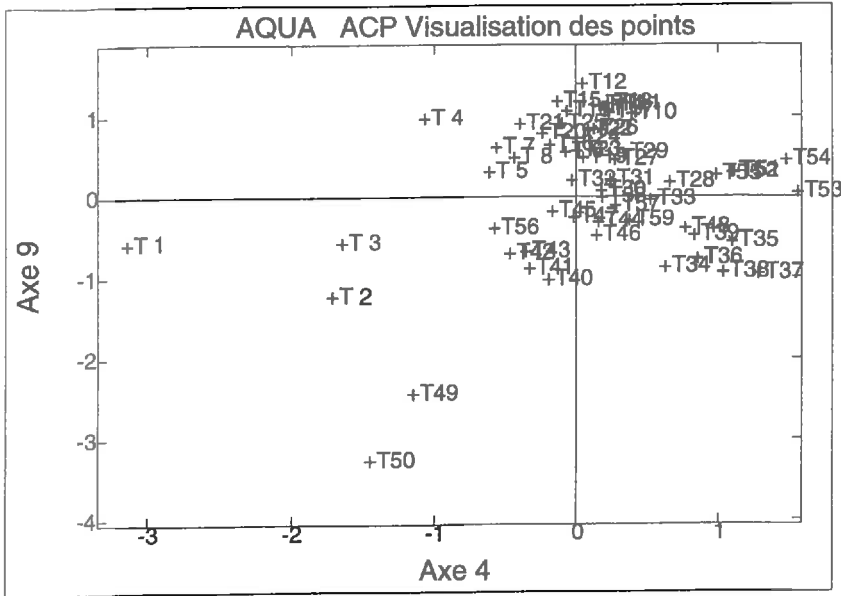


ETUDE STATISTIQUE DES VARIATIONS CHIMIQUES DES EAUX DE LA CRUE DU
15-16 JUILLET 1994 A L'EXUTOIRE.

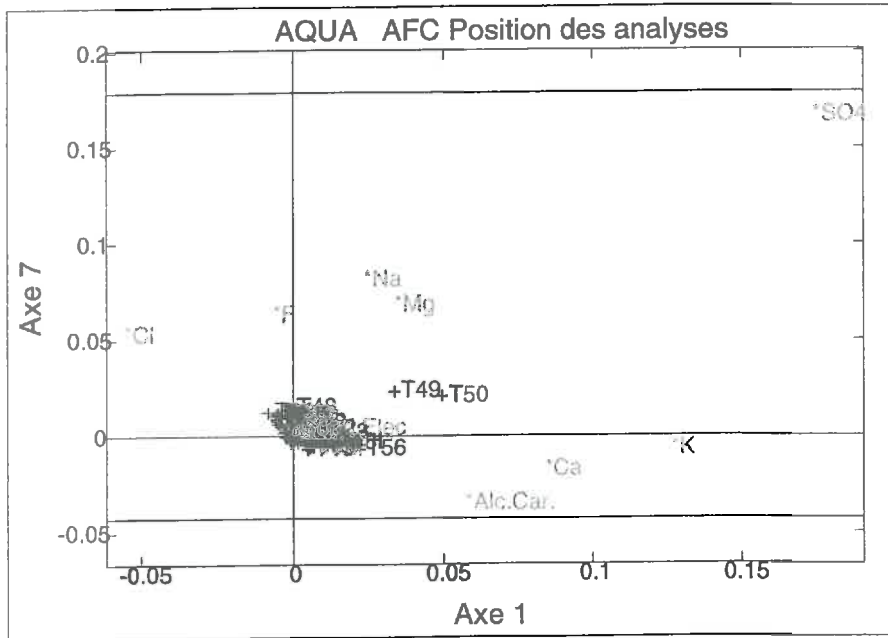


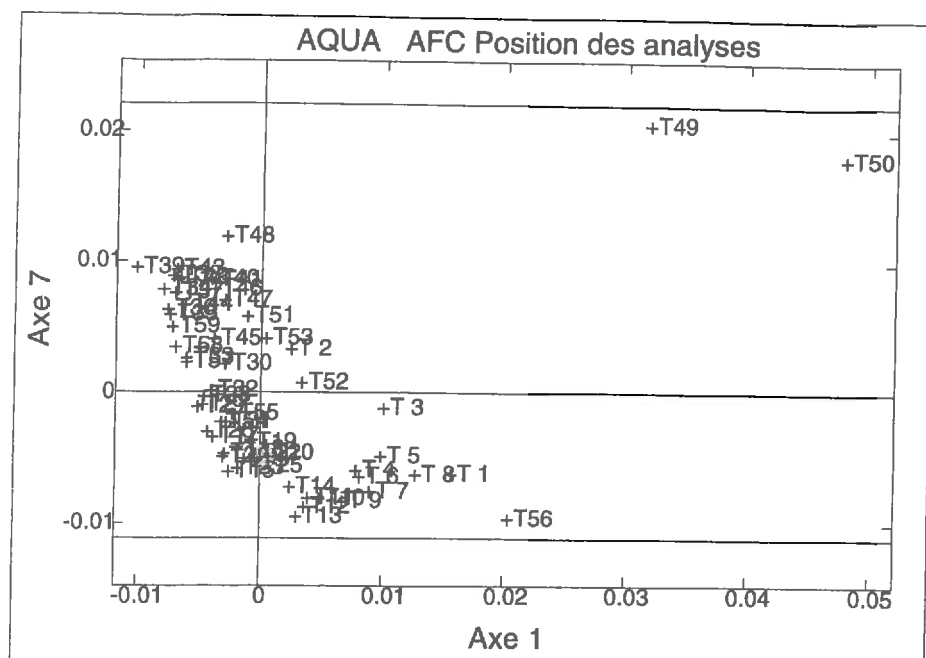
ACP
39,4+30,3%





AFC
54,4+28,0%





ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES SPATIALES DES ANALYSES D'EAU

Cette étude statistique a été réalisée sur le jeu de données spatiales ayant servi au tracé des cartes de répartition des différents éléments dissous. Elle concerne 217 analyses sur lesquels ont été dosés 12 paramètres.

Le diagramme de Piper montre l'existence de divers faciès organisés autour de plusieurs pôles:

- un pôle sulfaté calci-magnésien correspond aux eaux acides du secteur Vitissay;
- un pôle carbonaté calcique sur les zones sédimentaires ou peu métamorphiques
- un pôle carbonaté plus sodique que le précédent sur les roches cristallines

Matrice des corrélations:

La matrice des corrélations fait apparaître des fortes corrélations positives entre la conductivité électrique, H⁺, SO₄, Al et Mg. En effet, ces éléments sont fortement concentrés dans les eaux acides du secteur Vitissay et dilués ailleurs.

L'analyse en composante principale.

Elle oppose sur le premier axe (53,4% de variance) le groupe CE, H⁺, SO₄, Al, Mg, Ca aux autres éléments. Le second axe (17,4%) oppose Na, Cl à CE, H⁺, SO₄, Al, Mg, Ca, NO₂, Alcalinité. NO₃, K et PO₄ se situent en position intermédiaire.

Il ressort 3 groupes de paramètres bien individualisés:

Na, Cl

NO₃, K, PO₄

SO₄, H⁺, SO₄, Al, Mg, Ca

Les nitrites et l'alcalinité carbonatée sont isolés.

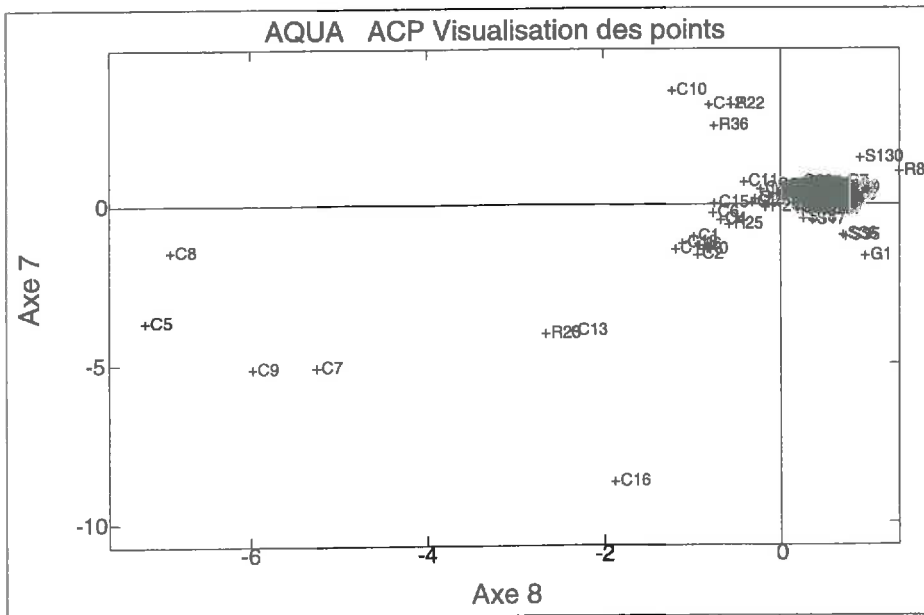
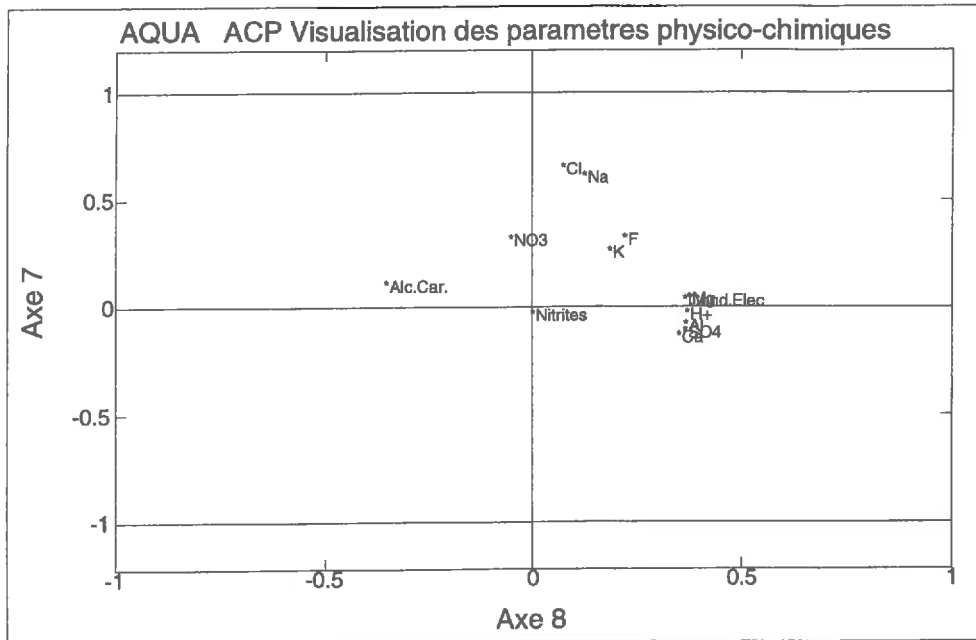
La distribution des échantillons d'eau dans ce premier plan factoriel montre la particularité des points du secteur Vitissay (série C), avec une distinction entre les eaux de ruissellement et les eaux d'origine plus profonde.

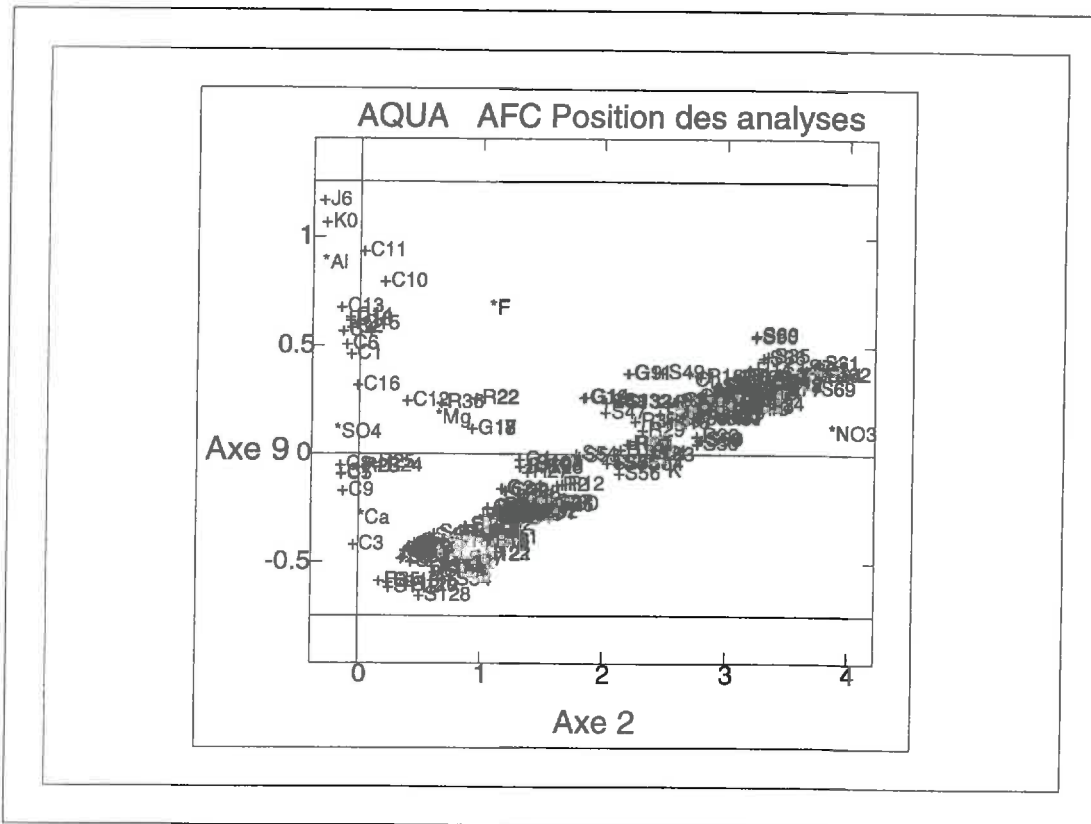
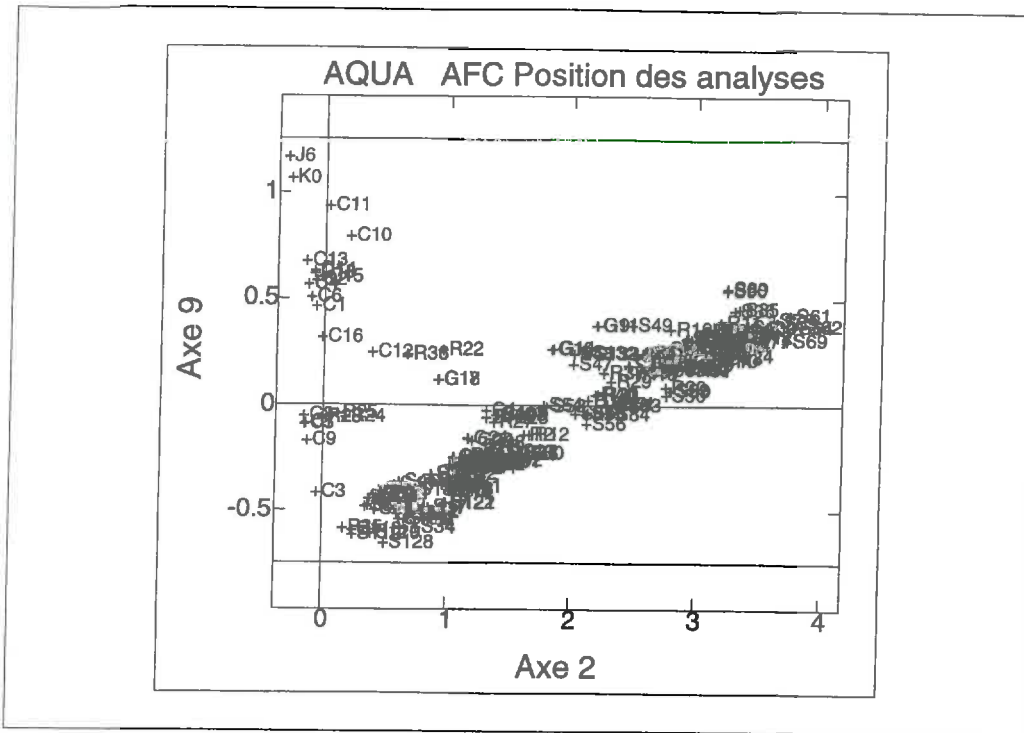
L'analyse factorielle des correspondances

Le premier plan factoriel représentant 80% de la variance présente différents pôles chimiques: Un pôle concentré constitué par les eaux acides et caractérisées par Al,SO₄,Mg , un pôle dilué marqué par Na et Cl;

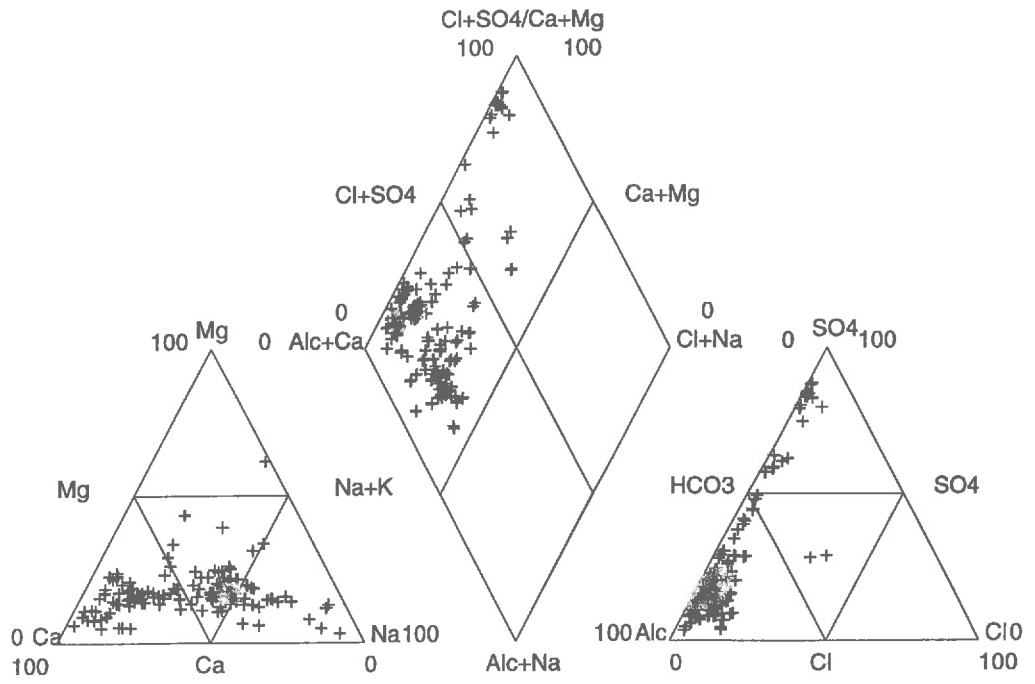
NO₃ et K, probablement d'origine biologique voire anthropique sont assez proches. La position du Calcium est proche des paramètres caractéristiques des eaux acides mais s'en éloigne quelque peu.

Cette distribution révèle une distribution spatiale complexe avec au minimum 3-4 pôles.





AQUA Diagramme de PIPER



ANNEXE II

**ETUDE GEOCHIMIQUE DES TERRES RARES DANS LE BASSIN VERSANT DU RIO
BOCONO**

Géochimie des terres rares dans des solutions de sols hyper acides tropicaux.

Cas du bassin versant du Rio Bocono (Andes Vénézuéliennes).

Mirla Cornieles, Luis Auque, Maria-Jose Gimeno, Alain Aventurier, Vincent Vallès, Bernard Reynier et Pedro Lopez

M.C. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Avenida 6 Este, Esquina y edificio Camejo, Caracas 1010, Venezuela
Laboratoire d'hydrologie, Université d'Avignon, 35 rue Louis Pasteur, France

L.F.A. et P.L.J. Área de Petrología y Geoquímica. Depto. Ciencias de la Tierra. Fac. Ciencias. Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza, Espagne.

M.J.G. Programa de Comportamiento Ambiental de Contaminantes Convencionales. Instituto de Medio Ambiente-CIEMAT. Avenida Complutense, 22. 28006 Madrid, Espagne.

A.A. Unité de Recherches et d'Analyses. CIRAD. Avenue d'Agropolis. BP.5035, 34032 Montpellier cedex .France.

B.R. Laboratoire de Géochimie, URA 067 CNRS, 38 rue des 36 Ponts, 31400 Toulouse.

V.V. Unité de Science du Sol, INRA Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France; tél: (33) 04 90 31 62 43; FAX (33) 04 90 31 62 44; e-mail: val@avignon.inra.fr
(corresponding author)

Titre réduit: Géochimie des terres rares dans des sols acides vénézuéliens
Short title: Rare earths geochemistry in venezuelian acid soils.

Résumé:

Des solutions acides dont les pH sont compris entre 2,3 et 3,5 ont été prélevées dans la frange saturée de sols tropicaux se développant sur des lutites pyriteuses. Les terres rares (REE) présentent une distribution convexe asymétrique après normalisation avec le standard NASC ou la roche mère. Les terres rares intermédiaires sont relativement plus abondantes que les REE lourdes; les REE légères sont les moins abondantes. L'attaque sélective conduite avec HCl et avec l'hydroxylamine montre que c'est la distribution des REE fixées sur certains minéraux, probablement des oxydes métalliques, qui sont responsables de la convexité asymétrique observée dans les solutions.

mots clés: terres rares, sols acides, altération, pyrite, géochimie.

**RARE EARTHS GEOCHEMISTRY IN TROPICAL HYPER ACID SOIL SOLUTIONS.
CASE OF THE RIO BOCONO WATERSHED (VENEZUELAN ANDES)**

Abstract:

Acid solutions whose pH varied between 2,3 and 3,5 were collected in the saturated fringe of tropical soils developed on pyrite lutites. The analysis of rare earths (REE) shows an asymmetric convex distribution; the intermediate REE are more numerous than heavy or light REE, the latter being less numerous than heavy REE, after normalisation using NASC standard or the lutite. Intermediate rare earths are more numerous than heavy REE. Selective dissolution with HCl and with hydroxylamine point out that the distribution of REE bounded with some minerals, probably with metallic oxides, are accountable for the asymmetric convexity observed in the solutions.

Key words: rare earths, acid soils, weathering, pyrites, geochemistry.

Abridged English Version

The dynamic of rare earths in natural surface waters is of particular interest for geochemists but the solutions which were examined, concerned essentially sea-water, neutral lake or river water (De Baar and al., 1988, Elderfield and al., 1990, Johanneson and al., 1996). The few studies available for acid waters were carried out to show specificities in connection with the mechanisms that are accountable for the distribution of rare earths. It concerns, for example, their convex distribution which often happens for these acid waters (Auque and al., 1993, Johanesson and Lyons, 1995, Nordstromm and al., 1995), or competitive effects for the formation of complexes (Auque and al., 1995, Gimeno and al., 1996), or the fractionation of amorphous phases that occur during the processes of precipitation (Auque and al., 1993, Nordstromm and al., 1995).

This study aims at examining tropical soil-solutions from the Andes of Venezuela (fig.1), the chemical properties of which are specific because of their strong acidity. As a matter of fact, there is not a wealth of literature that deals with this specific situation.

Solutions were collected in the Rio Bocono watershed which covers an area of 1 500 km², near Niquitao city (fig.1). Similar soils can be easily observed out of this side basin which is of great interest for this area (Cornieles and Valles, 1995). In contact with a large fault, these soils developed on pyrites lutites which evolved in places in coal breccia forms. These soils are extremely acid and the pH (Table I) is at least nearly 3.0 but can reach 2.3 in some cases (Cornieles and Valles, 1995).

These hyper acid waters dissolve very high quantities of metals, especially iron and aluminium. Neutralization of acid waters by diluted alkaline waters coming from high zones of this area leads to a strong precipitation of aluminium sulfate gels easy to observe on this site. These processes are comparable to those described in Spain by Auque and al. (1993).

These quite original soils are different from the mangrove swamp soils involving sulfate reduction because of many factors such as the lack of sodium chloride salinity or a spacial distribution of acidity independent on the topography. Moreover, although solutions have been collected during one year, we can observe no seasonal variability of the characteristics.

Twenty samples of solutions collected in the saturated fringe of soils, directly when the ground water is outcropped or because of extra-filtrations, were microfiltered to within about 0.1 µm. pH, electric conductivity and temperature were measured on site. The complete dissolution was performed on the bed rock as well as three selective attacks using HCL 1N, hydroxylamine Hcl 0.1M and hydrogen peroxide (3%).

The determination of major anions was performed with capillary electrophoresis, major cations and metals were analysed with atomic absorption spectrometry, rare earths with ICP-MS. In all cases, calibration was performed with synthetic solutions.

Our results demonstrate that the total quantity of rare earths raises with the acidity of solutions (fig.2) just as electric conductivity is dependent on sulfate concentration produced by oxidation of pyrites.

Moreover, these acid solutions contain very high concentrations of dissolved metals such as manganese, zinc, iron and aluminium. The molarity of this latter element can reach about ten millimoles per liter. Important traces of uranium and thorium were also found. Sulfate is the more abundant anion (Tab.1).

The rare earths concentrations of solutions are important if compared with other acidic waters described in the literature. After normalisation with NASC standard of REE contents of solutions, the distribution is strongly convex and asymmetric (Fig.3 and 4). Light rare earths are less numerous than heavy rare earths and the intermediate rare earths are the most important. If the convexity of the rare earths distribution is well known for natural acid waters (Johanesson and Lyons, 1995, Nordstromm and al. 1995), on the other hand the observed asymmetry for the venezuelian case is quite original.

Comparative tests of rare earths analysis of samples not subjected to microfiltration and nor acidification showed variations according to the process. This result suggests that a part of rare earths can be bound to amorphous phases which are particularly numerous in this context (Auque and al. 1993, Nordstrom and al. 1995).

The rare earths concentration of the bed rock is 4 times as large as the NASC standard of lutites but the proportion between elements fits with a quite usual pattern. The variation of the bed rock concentration according to the rare earth atomic number cannot explain the asymmetric convex pattern observed in these solutions (Fig. 3A). The REE content in Venezuelan soil solutions is very high in comparison with other acidic natural solutions (Fig.4).

The speciation computations were performed with the PHREEQE model (Parkhurst and al. 1990). The computations of activity coefficients used Davies equation because the ionic strength of these solutions is lower than the limit of validity of this law which is around 0.1 molar (Schijf and al. 1995). The thermodynamic data concerning the rare earths compiled by Auque and al. (1994) and Gimeno and al. (1996) were introduced in the database.

The results show that the free concentration of rare earths is minor and accounts only 5 to 10% of the total dissolved concentration and that this percentage is a function of acidity of the solution. Mono sulfate complexes and mostly di-sulfate (tetravalent) make up the basic species linked to dissolved rare earths (Fig. 5). However, these percentages of complexation are little dependent on the rare earth atomic number. So, the convex asymmetric distribution displayed by this set of samples cannot be explained by a competition between rare earths complexed with the sulfate anion which has been shown in other cases (Auque and al. 1995, Gimeno and al. 1996).

Moreover, solutions carried out with hydrochloric acid and especially those obtained with hydroxylamine showed a convex asymmetric distribution (Fig.3 A and B). This result suggests that dissolved rare earths derive from the specific solubilisation of well identified solid phases (Fig. 6), probably metallic oxides, because of the natural acidity of these solutions.

Results carried out with hydrogen peroxide attack are not shown because of a high variability of the trials. However, it is likely that a part of rare earths is bounded with organic matter. After its destruction with hydrogen peroxide, a part of rare earths precipitate with another solid phase. Then, the concentration of rare earths decreases as the duration between dissolution and analysis increases.

The intensity of acidification process, the increasing of hitted areas and the convexity of the rare earths distribution show that this andean area of Venezuela is quite original and interesting for further studies.

I. INTRODUCTION

Ces dernières années, l'étude du comportement géochimique des Terres Rares (REE pour Rare Earth Element) dans les solutions naturelles à basse température a connu un important regain d'activité. Les eaux de pH neutre ou légèrement alcalin telles que les eaux de mer, de lacs,.. (De Barr *et al.* 1988; Ederfield *et al.*, 1990; Möller et Bau, 1993; Johannesson *et al.*, 1996,...) ont attiré particulièrement l'attention. En revanche, les travaux réalisés sur des eaux naturelles acides sont plus rares. Cependant, les caractéristiques de ce type de solutions sont particulièrement favorables à l'étude de certains aspects importants de la géochimie de ces éléments comme par exemple le développement fréquent de divers systèmes de distribution convexe (Auque *et al.*, 1993; Johannesson et Lyons, 1995; Nordstrom *et al.*, 1995), leur fractionnement durant la précipitation de phases amorphes (Auque *et al.*, 1993; Nordstrom *et al.*, 1995), ou encore la présence de certains effets de compétition pour la formation de complexes de ces éléments en solution (Auque *et al.*, 1995; Gimeno *et al.*, 1996).

Un travail récent (Cornieles et al. 1994 et 1995) réalisé sur des sols d'un bassin versant vénézuélien, a révélé l'existence de surfaces importantes de sols affectés par une acidité très marquée. Ce travail est consacré à l'analyse et au mode de distribution des REE dans un environnement de basses températures constitué par des solutions de ces sols hyperacides.

II MATERIEL ET METHODES

Localisation du site et caractères généraux des solutions.

Implanté dans les Andes vénézuéliennes à la faveur d'une importante faille, le site étudié est localisé dans le bassin versant du Rio Bocono. Dans ce bassin de 1 540 km², des sols hyperacides se développent fréquemment et en particulier aux environs de la localité de Niquitao (Figure 1). La zone retenue est située à 2 km au nord-est de cette agglomération.

La roche-mère sur laquelle se développent ces sols est une lutite pyriteuse paléozoïque. L'oxydation de ces sulfures constitue le mécanisme responsable de la formation de ce type de sols hyperacides, engendrant des solutions de sol de pH inférieur à 3 dans les zones les plus affectées et des pH compris entre 3 et 5 dans les zones périphériques. Le suivi réalisé sur le champ montre que les variations saisonnières du pH sont très faibles (Cornieles et Valles, 1995).

La capacité de solubilisation de l'aluminium et du fer de ces solutions est donc particulièrement élevée. En effet, lorsque les eaux alcalines et diluées provenant des parties hautes du paysage se mêlent localement avec les eaux acides, la précipitation massive de phases amorphes alumino-sulfatées et d'oxyhydroxydes ferriques peut être observée selon un processus comparable à celui décrit par Auque *et al.* (1993) dans le torrent 'Arroyo del Val' en Espagne.

Echantillonnage et analyses

Les eaux acides utilisées dans ce travail ont été prélevées lors d'une campagne essentiellement centrée autour de la commune de Niquitao (fig.1). Les 20 échantillons proviennent de solutions de sols saturés d'eau, prélevées à l'occasion d'exfiltrations sous forme de sourcins ou bien directement prélevées dans la nappe lorsque cette dernière est sub-affleurante. Dans tous les cas, ces solutions ont une origine superficielle et résultent des interactions entre l'eau de pluie et la roche-mère.

-Le pH, la température, la conductivité électrique des solutions ont été mesurés sur le terrain à partir de fractions aliquotes des solutions prélevées. Les solutions ont été microfiltrées à 0,45 µm. Le conditionnement a été réalisé dans des flacons de polyéthylène de 260 ml.

-Les anions majeurs ont été dosés, après dilution, par électrophorèse capillaire (Waters). Les cations majeurs et les métaux ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique (Perkin-Elmer 5100 Zeeman) et spectrométrie d'émission ICP (Jobin-Yvon JY24).

Les résultats sont rassemblés dans le tableau I.

-Les terres rares ont été dosées, après filtration à 0,1 μm et acidification, par spectrométrie d'émission couplée ICP-MS dans deux laboratoires, l'un au Canada avec ICP-MS de type VG Plasma Quad et l'autre en France avec un spectromètre Perkin-Elmer. Dans les deux cas, la calibration a été réalisée à partir de standards synthétiques inclus dans les séries.

La précision des analyses est de 5% pour toutes les terres rares. Les erreurs sur la balance ionique oscillent entre 4 et 15% (sauf pour la solution C-5 qui présente un écart de 22%), ce qui est très acceptable pour ce type de solutions (Nordstrom *et al.*, 1990a).

Des essais de répétition des analyses ont donné des variations légères et aléatoires des résultats, même sur des fractions aliquotes non filtrées. Ces variations de faible amplitude sont sans conséquence sur l'étude des mécanismes de distribution des terres rares. Elles peuvent cependant traduire une possible contribution des particules en suspension et des colloïdes sur la teneur en terres rares, corroborant ainsi les observations de Johannesson et Lyons (1995).

-Pour la roche-mère, l'analyse de la teneur totale a été réalisée après broyage dans un mortier en agate et attaque totale par un mélange HF, HCl et HNO₃. Trois attaques sélectives de la roche-mère ont été réalisées, la première avec HCl 1N, la seconde avec l'hydroxylamine/HCl 0,1 M et la dernière avec l'eau oxygénée (3%). L'analyse a été réalisée par spectrométrie ICP-MS à 0,1 ppm près pour toutes les terres rares, sauf Eu et Lu dont la précision est de 0,05 ppm. Les résultats obtenus figurent dans le tableau I.

Calculs de spéciation.

Les calculs de spéciation ont été effectués avec le modèle PHREEQUE (Parkhurst *et al.*, 1990) qui utilise l'équation de Davies. Les constantes de stabilité obtenues récemment pour les complexes inorganiques (Auque *et al.*, 1994; Gimeno *et al.*, 1996) ont été incluses.

Les données thermodynamiques concernant les autres éléments majeurs et mineurs impliqués dans le calcul de spéciation sont celles originellement intégrées au programme PHREEQUE après la révision proposée par Nordstrom *et al.* (1990b). Tous les calculs ont été réalisés à 25°C, qui est la seule température pour laquelle les données thermodynamiques concernant les terres rares sont disponibles.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Concentrations et abondance relative des terres rares

Les solutions analysées présentent des valeurs de pH basses, entre 2,3 et 3,35 (Tableau I), ainsi que de fortes teneurs en sulfates et en éléments métalliques.

Bien que la gamme de pH soit relativement étroite, les teneurs en REE sont très variables (fig.1) mais assez élevées dans l'ensemble. La concentration totale en REE augmente avec la conductivité et diminue avec le pH. En effet, plus les eaux sont riches en acide sulfurique, produit de l'oxydation de la pyrite, plus elles sont concentrées et agressives pour la dissolution des métaux et des terres rares. Les molalités en aluminium atteignent des valeurs remarquables de l'ordre de plusieurs dizaines de mM/l.

Les teneurs en terres rares sont élevées comme dans les cas d'eaux acides d'autres sites et elles atteignent 0,113 à 1,24 ppm de REE totales. Ces valeurs sont 1 000 à 10 000 fois plus élevées que celles rencontrées pour l'eau de mer. Elles présentent le même ordre de grandeur que les solutions de sols acides de la zone de Badenas en Espagne (Echantillon BS-3, Arroyo del Val de la figure XXX, d'après Auque *et al.*, 1993; Gimeno *et al.*, 1996 a) et à celles des montagnes San Juan Mountains des USA (Echantillon 90WA111 d'après Nordstrom *et al.*, 1995); seules les eaux acides des mines brésiliennes d'uranium de Osamu-Utsumi (échantillon GW-47, d'après Miekeley *et al.*, 1992) présentent des teneurs en REE légèrement plus élevées que celles des sols acides vénézuéliens.

La teneur en REE de la lutite carbonneuse est en moyenne deux fois plus forte que le NASC (North American Shale Composite; Haskin *et al.*, 1968; Gromet *et al.*, 1984), mais le profil de distribution est parallèle à ce standard (Fig. XX). Ainsi, les proportions entre éléments dans la roche-mère est conforme au standard des lutites.

Mécanismes de distribution des terres rares dans les solutions de sol.

La distribution des teneurs en REE en fonction de leur numéro atomique présente une distribution convexe asymétrique après normalisation avec le NASC. Les terres rares légères (LREE) sont moins abondantes que les terres rares lourdes (HREE), les terres rares intermédiaires étant les plus abondantes en solution, quelle que soit l'acidité des échantillons.

Si la convexité de la distribution est connue pour les eaux acides naturelles (Johannesson et Lyons, 1995; Nordstrom et al., 1995), l'asymétrie observée dans le cas vénézuélien est, par contre, originale. Cette distribution persiste si la roche-mère est utilisée pour la normalisation, ce qui montre que la convexité asymétrique observée dans les solutions n'est pas liée à une distribution initiale dans la roche-mère. Les calculs de spéciation montrent que l'augmentation des teneurs en sulfates favorise la complexation des terres rares. Les taux de complexation sont élevés; les formes prédominantes sont les complexes monosulfatés et surtout di-sulfatés (tétravalents). Cependant, les taux de complexation sont relativement constants selon le numéro atomique et ces processus ne peuvent être invoqués pour expliquer le caractère asymétrique de la distribution comme cela a été montré dans d'autres cas (Auque *et al.*, 1995; Gimeno *et al.*, 1996).

Il convient donc d'essayer d'étudier la spéciation solide de ces éléments dans la roche-mère par le biais des extractions séquentielles.

Les solutions issues de l'attaque à l'acide chlorhydrique présentent une distribution convexe relativement symétrique, comme pour la plupart des solutions de sol acides. Par contre le caractère asymétrique est peu marqué, voire absent. L'attaque avec l'eau oxygénée a été réalisée à plusieurs reprises pour solubiliser préférentiellement les éléments fixés à la matière organique. La répétabilité des mesures chimiques est mauvaise. En effet, lorsque le temps séparant l'attaque de l'analyse augmente, la quantité de REE dissoutes diminue, ce qui suggère une précipitation des éléments fixés sur la matière organique et libérés par l'attaque à l'eau oxygénée. Cependant une série moyenne a été représentée sur la figure XX. Elle suggère de faibles teneurs et une distribution qui pourrait être convexe. Cependant les problèmes évoqués plus haut ne permettent pas de conclure. En revanche l'attaque avec l'hydroxylamine utilisée pour l'attaque spécifique des oxydes métalliques solubilise une grande quantité de terres rares avec une distribution convexe asymétrique comparable à celle observée dans les solutions de sol. Ce résultat suggère que les terres rares dissoutes proviennent de la solubilisation d'oxydes métalliques par l'acidité naturelle de ces solutions.

IV CONCLUSION

Les solutions de sols acides vénézuéliens étudiées dans ce travail sont originales. En effet, leur acidité très élevée provoque une forte solubilisation de métaux et terres rares; de plus, la distribution des terres rares présente une convexité asymétrique. Cette dernière caractéristique ne peut être expliquée par la distribution des REE de la roche-mère dans son ensemble qui est conforme au standard; elle semble plutôt liée à une fraction solide de la roche-mère, probablement des oxydes métalliques particulièrement solubles dans ces eaux hyper-acides.

Le devenir des REE lors du mélange des solutions de sol acides avec des eaux légèrement alcalines de la même région font l'objet d'études complémentaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Auqué, L.F.; Tena, J.M.; Gimeno, M.J.; Mandado, J.; Zamora, A. y López Julián, P. (1993). Distribución de tierras raras en soluciones y coloides de un sistema natural de aguas ácidas (Arroyo del Val, Zaragoza). *Estudios Geológicos*, 49, 41-48.
- Auqué, L.F.; Tena, J.M.; Gimeno, M.J.; Mandado, J.; López Julián, P. y Zamora, A. (1994). Especiación de Tierras Raras en las soluciones ácidas y neutras del sistema de drenaje del Arroyo del Val (Zaragoza). *Estudios Geológicos*, 50, 179-188.
- Auqué, L.F.; López, P.; Gimeno, M.J.; Mandado, J.; Gómez, J. y Zamora, A. (1995). Pautas de especiación de las Tierras Raras en las soluciones ácidas de Osamu-Utsumi, Poços de Caldas (Brasil). *Rev. Acad. Ciencias Zaragoza*, 50, 145-154.
- Banfield, J.F. y Eggleton, R.A. (1989). Apatite replacement and rare earth mobilization, fractionation, and fixation during weathering. *Clays and Clay Minerals*, 37, 113-127.
- Cornieles, M. y Valles, V. (1995). Effets de la production d'acidité par oxydation de pyrite su la végétation et l'érosion dans le bassin versant du rio Bocono (Andes venezueliennes). Comptes Rendus du GRESSAP-ORSTOM, Montpellier, 12 Septembre, 1995. pp. 11-16.
- De Baar, H.J.W.; German, C.R.; Elderfield, H. y Van Gaans (1988). Rare earth element distributions in anoxic waters of the Cariaco Trench. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 1203-1220.
- Elderfield, H. y Greaves, M.J. (1982). The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296, 214-219.
- Elderfield, H; Upstill-Goddard, R. y Sholkovitz, E.R. (1990). The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54, 971-991.
- Gimeno, M.J.; Auqué, L.F.; López, P. y Mandado, J. (1995). Rare earth element aqueous speciation in the acidic and neutral solutions of the "Arroyo del Val" system, Iberian Chain, Spain. *MIGRATION'95*, Abstracts, pág. 97. Saint-Malo, France. September 10-15, 1995.
- Gimeno, M.J.; Auqué, L.F.; López, P.; Gómez, J. y Mandado, J. (1996a). Pautas de distribución de especies de las Tierras Raras en soluciones ácidas naturales. *Estudios Geológicos*, 52, en prensa.
- Gimeno, M.J.; Auqué, L.F.; Nordstrom, D.K. y Bruno, J. (1996b). Rare earth element (REE) geochemistry and the tetrad effect in the naturally acidic waters of Arroyo del Val, Northeastern Spain. Geological Society of America. 1996 Annual Meeting. Denver, CO. Abstracts with Programs (en prensa).
- Gromet, L.P.; Dymek, R.F.; Haskin, L.A. y Korotev, R.L. (1984). The "North American Shale Composite": its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 2469-2482.

- Haskin, L.A.; Haskin, M.A.; Frey, F.A. y Wildeman, T.R. (1968). Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: *Origin and Distribution of the Elements* (L.H. Ahrens, ed.), pp. 889-911. Pergamon Press.
- Johannesson, K.H. y Lyons, W.B. (1995). Rare earth element geochemistry of Colour Lake, an acidic freshwater lake on Axel Heiberg Island, Northwest Territories, Canada. *Chem. Geol.*, 119, 209-223.
- Miekeley, N.; Couthino de Jesus, H.; Porto da Silveira, C.L.; Linsalata, P. y Morse, R. (1992). Rare-earth elements in groundwaters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. *Jour. Geochem. Explor.*, 45, 365-387.
- Möller, P. et Bau, M. (1993). Rare-earth patterns with positive cerium anomaly in alkaline waters from Lake Van, Turkey. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117, 671-676.
- Nordstrom, D.K.; Carlson-Fosch, V. y Oreskes, N. (1995). Rare Earth element (REE) fractionation during acidic weathering of San Juan Tuff, Colorado. The Geological Society of America. 1995 Annual Meeting. New Orleans, Luisiana, November 6-9, 1995. Abstracts with Programs. GS-Geochemistry III, Sesión 70, A-199.
- Johannesson, K.H.; Lyons, W.B.; Fee, J.A.; Gaudette, H.E. y McArthur, J.M. (1996). Geochemical processes affecting the acidic groundwaters of Lake Gilmore, Yilgarn Block, Western Australia: a preliminary study using neodymium, samarium and dysprosium. *J. Hydrol.*, 154, 271-289.
- Johannesson, K.H.; Stetzenbach, K.J.; Hodge, V.F. y Lyons, W.B. (1996). Rare earth element complexation behavior in circumneutral pH groundwaters: assessing the role of carbonate and phosphate ions. *Earth Planetary Science Letters*, 139, 305-319.
- Nordstrom, D.K.; Puigdomenech, I. and McNutt, R.H. (1990). *Geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brasil*. SKB Technical Report, 90-23, 33 p.
- Parkhurst, D.L.; Thorstenson, D.C. y Plummer, L.N. (1990). *PHREEQE. A computer program for geochemical calculations*. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations 80-96.
- Schijf, J. De Baar, H.J.W. y Millero, F.J. (1995). Vertical distributions and speciation of dissolved rare earth elements in the anoxic brines of Bannock Basin, eastern Mediterranean Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 3285-3299.

Tableau I: Exemples de composition chimique des solutions de sols acides Vénézuéliens et de la roche mère. Teneurs exprimées en mM/l pour SO_4^{2-} , Fe, Zn et Al et en ppm pour Terres Rares.

	C-1	C-5	C-10	C-14	Lutite
Temp. (°C)	22.7	22.8	20.5	21.1	
pH	3.35	2.30	2.97	3.1	
Conduct. (μS)	1600	4920	1169	1600	
SO_4^{2-}	7.89	58.46	4.30	10.03	
Fe _{Total}	0.03	9.35	0.08	0.08	
Zn _{Total}	0.05	0.15	0.02	0.04	
Al _{Total}	2.61	16.71	1.76	3.73	
Teneurs en Terres Rares					
La	$6.61 \cdot 10^{-3}$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$2.50 \cdot 10^{-3}$	$1.28 \cdot 10^{-2}$	78.90
Ce	$2.22 \cdot 10^{-2}$	$1.04 \cdot 10^{-1}$	$7.14 \cdot 10^{-3}$	$5.18 \cdot 10^{-2}$	160.00
Pr	$4.26 \cdot 10^{-3}$	$2.14 \cdot 10^{-2}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$	$1.09 \cdot 10^{-2}$	18.70
Nd	$2.91 \cdot 10^{-2}$	$1.49 \cdot 10^{-1}$	$1.17 \cdot 10^{-2}$	$7.17 \cdot 10^{-2}$	65.90
Sm	$1.80 \cdot 10^{-2}$	$1.12 \cdot 10^{-1}$	$7.65 \cdot 10^{-3}$	$3.71 \cdot 10^{-2}$	11.00
Eu	$4.74 \cdot 10^{-3}$	$3.16 \cdot 10^{-2}$	$1.95 \cdot 10^{-3}$	$9.09 \cdot 10^{-3}$	1.42
Gd	$3.41 \cdot 10^{-2}$	$1.81 \cdot 10^{-1}$	$1.39 \cdot 10^{-2}$	$4.84 \cdot 10^{-2}$	8.10
Tb	$5.11 \cdot 10^{-3}$	$2.74 \cdot 10^{-2}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$	$8.36 \cdot 10^{-3}$	1.30
Dy	$2.57 \cdot 10^{-2}$	$1.26 \cdot 10^{-1}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$	$4.16 \cdot 10^{-2}$	8.40
Ho	$4.25 \cdot 10^{-3}$	$1.94 \cdot 10^{-2}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$	$7.12 \cdot 10^{-2}$	1.72
Er	$9.52 \cdot 10^{-3}$	$4.38 \cdot 10^{-2}$	$4.22 \cdot 10^{-3}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$	5.20
Tm	$1.17 \cdot 10^{-3}$	$5.49 \cdot 10^{-3}$	$5.18 \cdot 10^{-4}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$	0.80
Yb	$5.82 \cdot 10^{-3}$	$2.82 \cdot 10^{-2}$	$2.58 \cdot 10^{-3}$	$9.67 \cdot 10^{-3}$	5.80
Lu	$7.70 \cdot 10^{-4}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$3.70 \cdot 10^{-4}$	$2.70 \cdot 10^{-4}$	0.88

Bassin versant du Rio Bocono. Andes venezueliennes

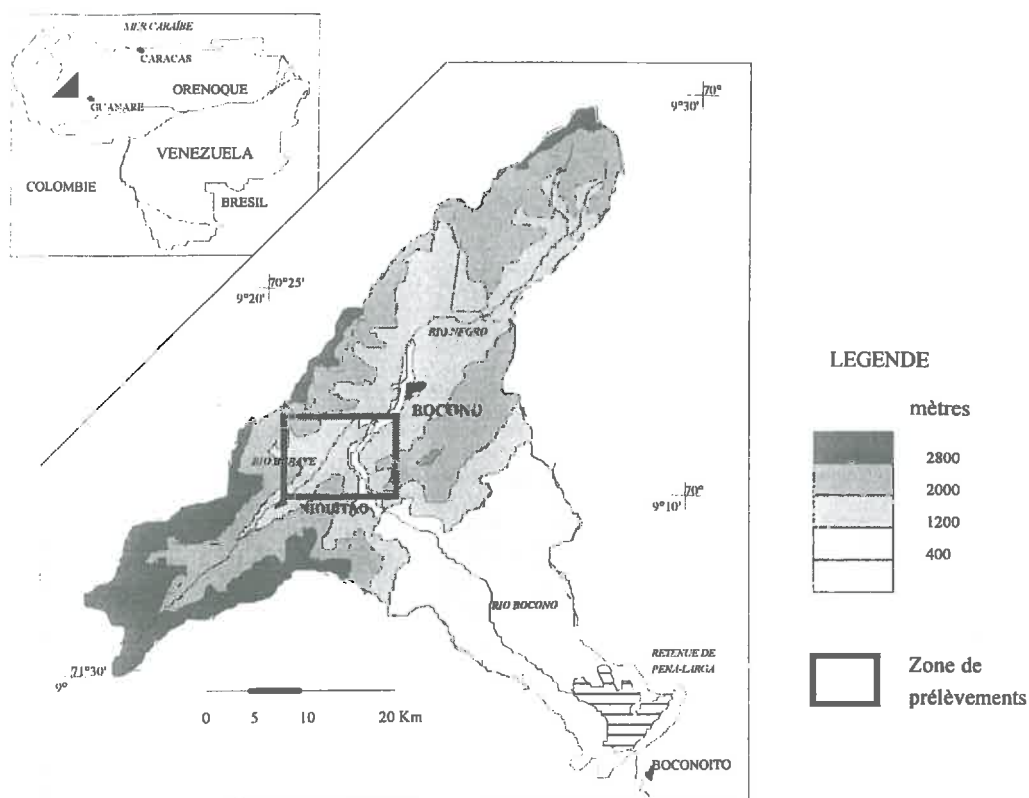


Figure 1: Localisation du bassin versant et de la zone de prélèvements
 Figure 1: Location of the watershed and of the sampling area.

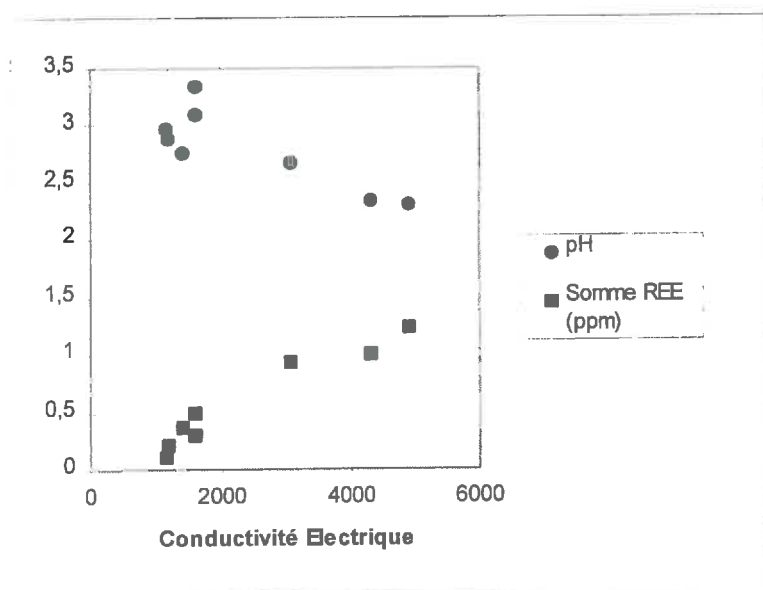


Figure 2: Variations du pH et de la teneur en terres rares (colog de la teneur totale en REE) en fonction de la conductivité électrique des solutions
 Figure 2: Variation of pH and total content of REE (expressed as colog of total content of REE) versus electrical conductivity of solutions

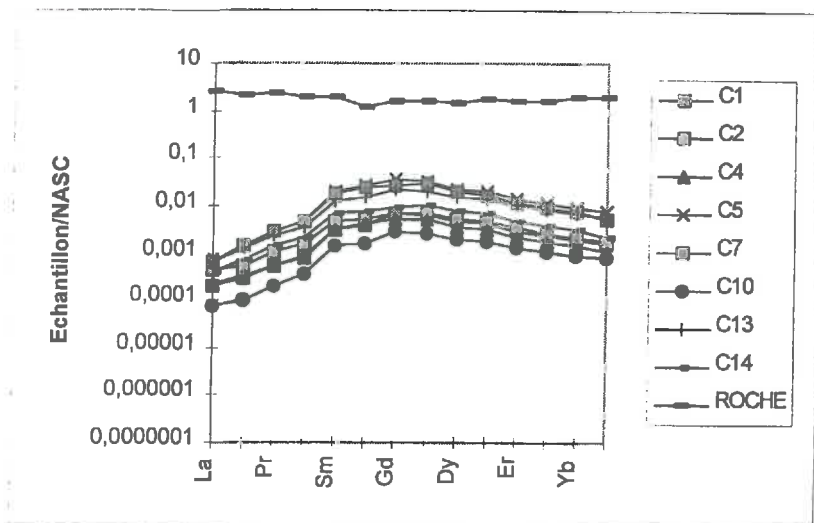


Figure 3A: Comparaison des teneurs en REE de la roche mère (lutite pyriteuse) et des solutions avec l'échantillon de référence (NASC)

Figure 3A: Comparison of REE content of lutite and solution with the NASC standard.

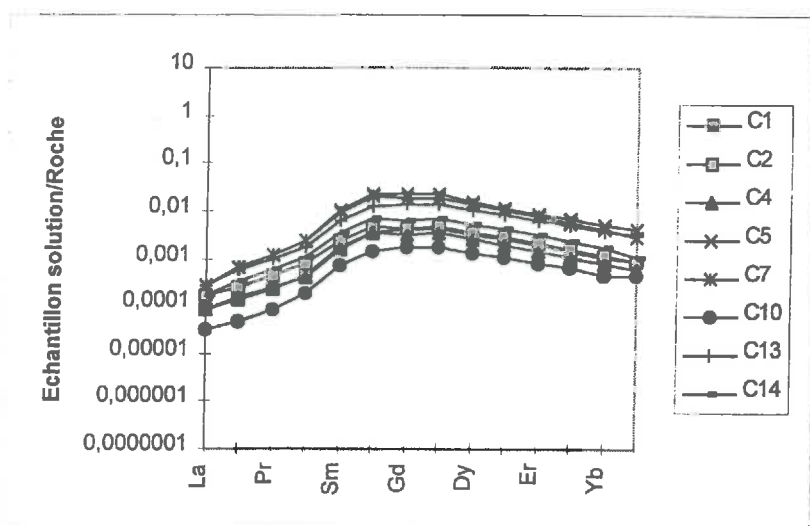


Figure 3B: Variations des teneurs normalisées en terres rares des solutions en fonction du numéro atomique (normalisation par rapport à la roche mère)

Figure 3B: Variation of REE content after normalisation by the bed-rock versus atomic number.

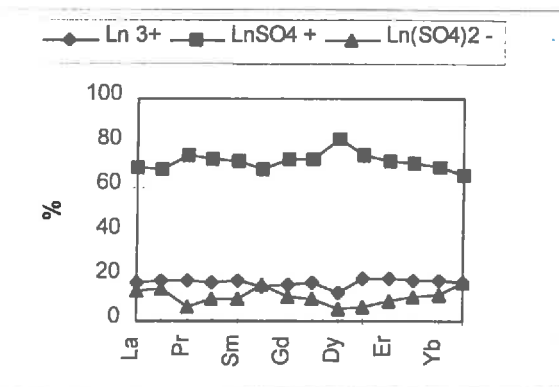


Figure 5: Variations de la spéciation des REE, en pourcent, pour la molalité moyenne en sulfate observée dans les solutions de sols acides vénézuéliens.

Figure 5: Variation of REE complexation ratio for a mean sulphate molality measured in acid Venezuelan soil.

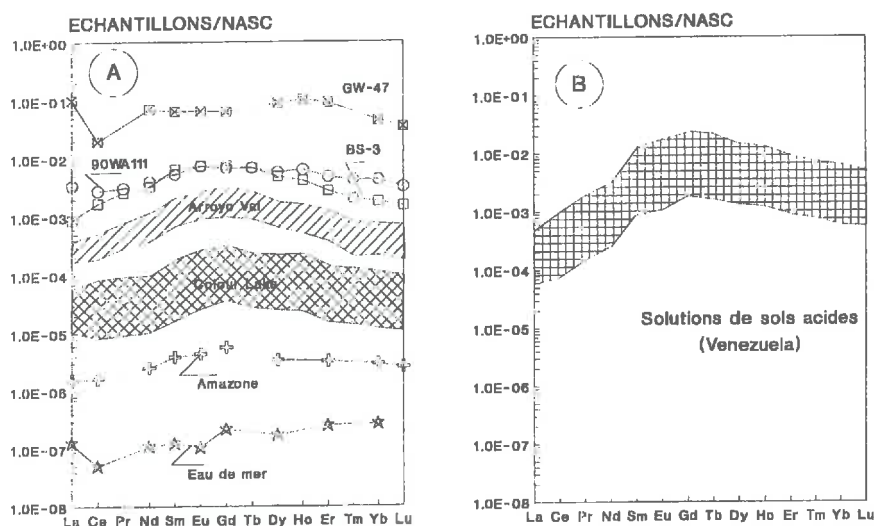


Figure 4: Variations des teneurs normalisées en REE des solutions de divers systèmes mondiaux (A) et comparaison avec les valeurs vénézuéliennes (B).

Figure 4: Variation of REE normalised content for several earth systems (A) and comparison with Venezuelan soil solutions (B).

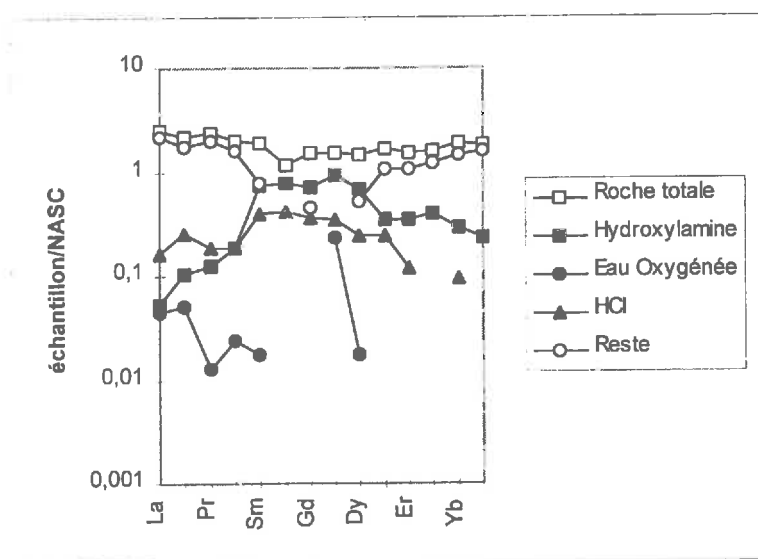


Figure 6: Variations de la teneur en REE pour diverses attaques de la roche mère.

Figure 6: Variation of REE content for several kinds of dissolution of the bed rock.

ANNEXE III

RESUME DES DONNEES CHIMIQUES DES DIFFERENTES SERIES DE PRELEVEMENTS

Boconó 9-10 juillet 1995: Prélèvements avant la confluence avec le Burate.

Série T

Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	MES (g/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	8,24	17,00	0,1022	77,500	0,01619	0,13058	0
Moyenne	8,44	18,27	2,4386	111,207	0,02111	0,20921	9,8E-05
Maximum	8,54	21,20	5,9289	161,800	0,02671	0,36383	0,00263

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinité (meq/l)
Minimum	0	0	0,03079	0,06947	0,50898	0,09847	0,57350
Moyenne	0,00586	0,00215	0,05997	0,09847	0,75937	0,15326	0,83263
Maximum	0,01461	0,00353	0,08427	0,12505	1,24601	0,20673	1,28261

Burate 9-10 juillet 1995. Série H

Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	MES (g/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	7,96	15,1	0,1692	121,5	0,01097	0,1917	0
Moyenne	8,20	16,6	8,9696	184,9	0,01519	0,3115	0
Maximum	8,35	19,4	29,3704	265,0	0,02073	0,5341	0

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinit. (meq/l)
Minimum	0	0	0,0389	0,0784	0,8478	0,1315	0,8858
Moyenne	0	0,00339	0,0796	0,1018	1,6802	0,1846	1,7162
Maximum	0	0,00553	0,1236	0,1240	2,6223	0,2458	2,6494

Corojó 9-10 juillet 1995. Série L

Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	MES (g/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	8,17	16,4	0,12679	145,2	0,01069	0,26683	0
Moyenne	8,43	17,2	1,26667	174,0	0,01227	0,32922	6,66E-06
Maximum	8,66	19,5	3,38210	234,0	0,01433	0,44399	500E-06

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinité (meq/l)
Minimum	0	0	0,00749	0,0279	1,1956	0,1832	1,1320
Moyenne	0,31E-03	2,74E-03	0,00952	0,0371	1,5021	0,2368	1,4410
Maximum	6,08E-03	4,53E-03	0,01251	0,0587	1,9212	0,3384	1,8307

Exutoire (Barrage) 15-16 juillet 1994. Série A

Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	MES (g/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	-	-	0,7342	134,0	0,00976	0,21044	0
Moyenne	-	-	2,7031	144,0	0,01529	0,26169	0
Maximum	-	-	7,2854	161,1	0,02011	0,61813	0

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinité (meq/l)
Minimum	0	0,00142	0,03780	0,06948	1,13723	0,18904	1,17968
Moyenne	0,00793	0,00493	0,04705	0,08862	1,25979	0,21679	1,32237
Maximum	0,02632	0,00863	0,07744	0,15905	1,69361	0,29023	1,76320

Séries spatiales (séries S, R, G., confondues); pH moyennes arithémique sur H+

Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	Al (mM/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	2,30	-	0	8,3	0,0037	0,0047	0
Moyenne	3,79	-	0,551	325	0,0290	6,2600	0,0003
Maximum	8,78	-	21,600	4920	0,2650	294,00	0,0293

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinité (meq/l)
Minimum	0	0	0,0006	0,0030	0,0016	0,0022	-57,10
Moyenne	0,0062	0,0147	0,0338	0,1590	4,8800	0,5720	-0,850
Maximum	0,0799	0,4070	0,3940	1,3100	228,00	11,080	3,840

Boconó 15-16 juillet 1994, ville de Boconó; rivière Boconó; Série B

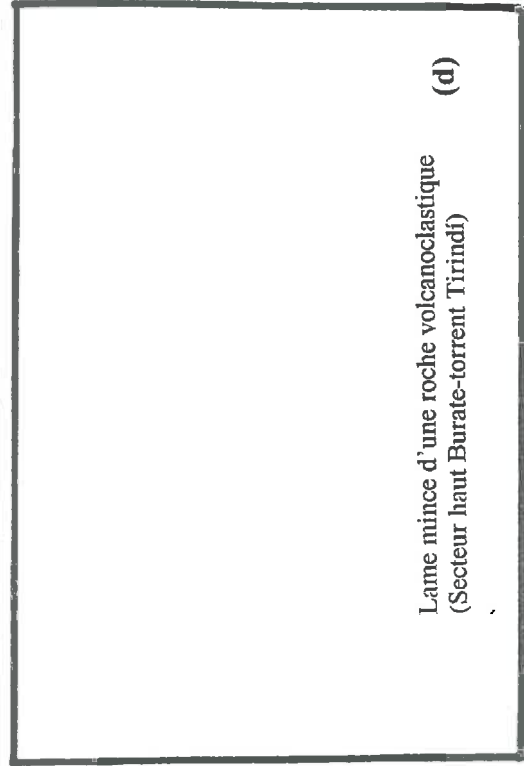
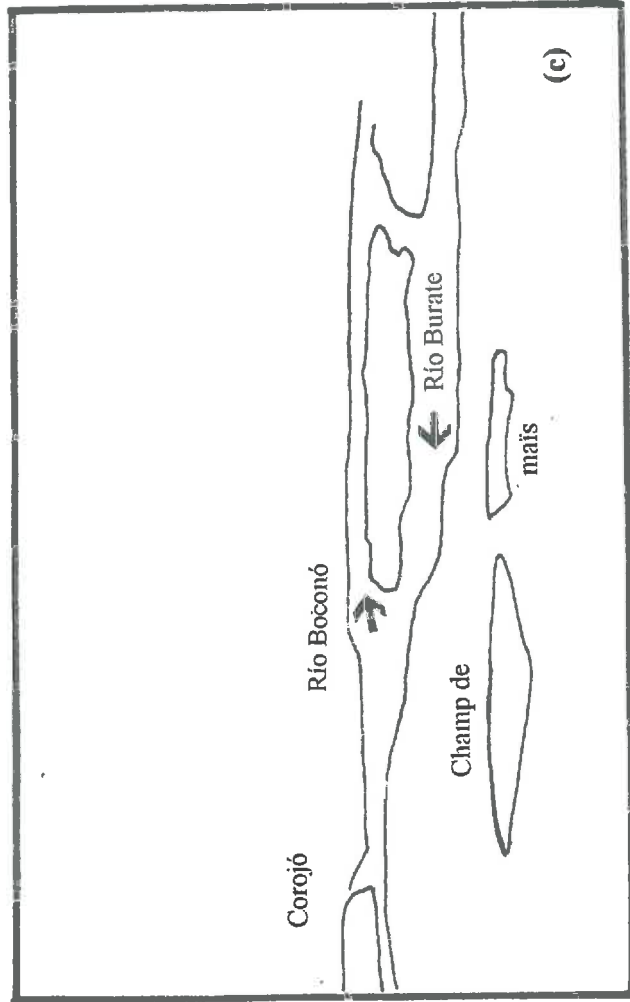
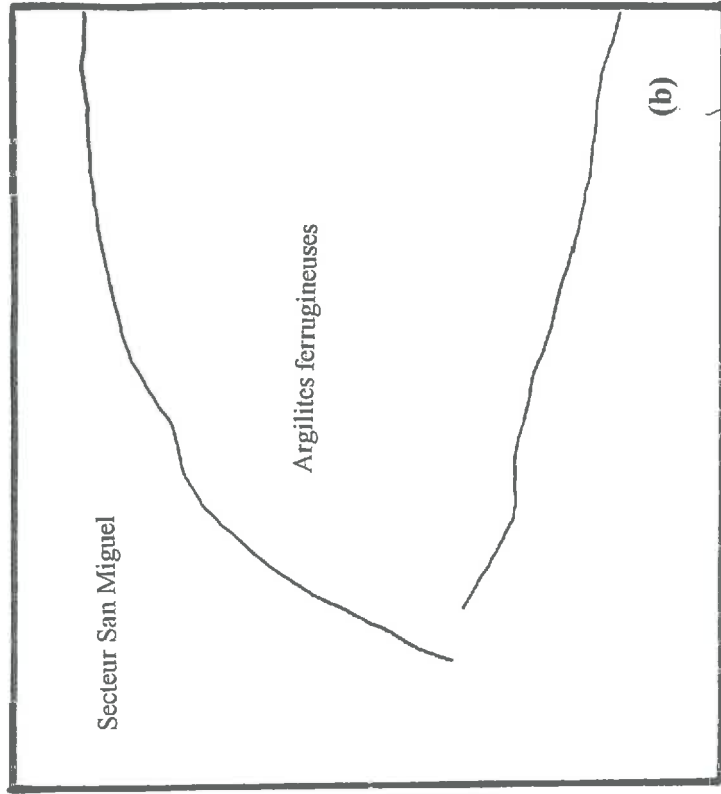
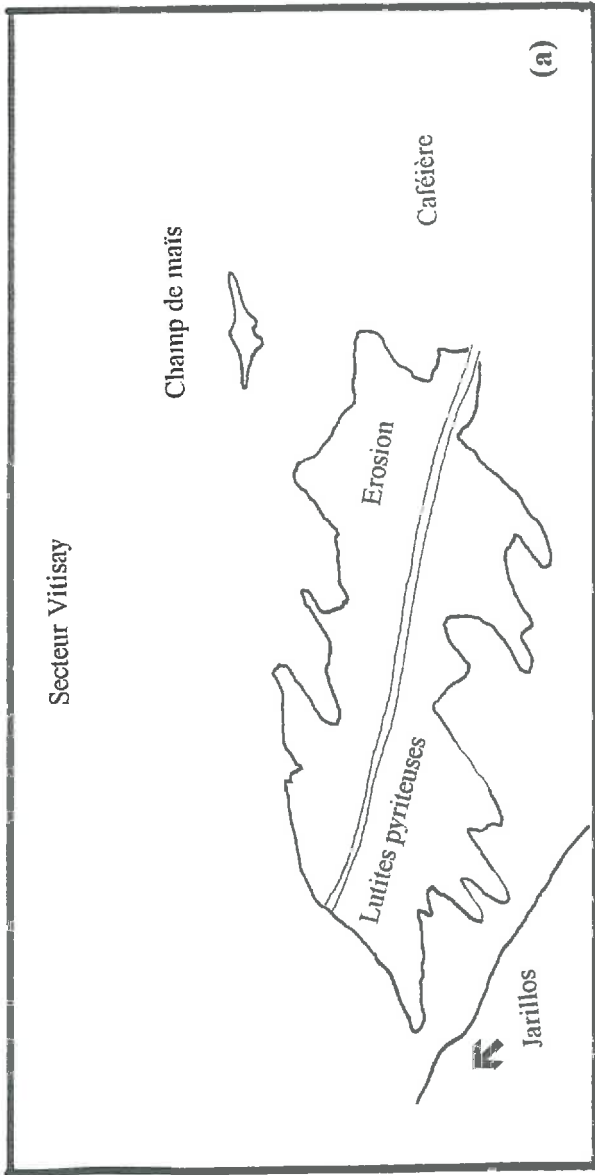
Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	MES (g/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	-	-	2,23	60,5	0,0147	0,0824	0
Moyenne	-	-	5,27	80,5	0,0225	0,1160	0
Maximum	-	-	10,60	113,0	0,0341	0,1728	0

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinité (meq/l)
Minimum	0	0,0023	0,0580	0,0689	0,380	0,0804	0,482
Moyenne	0	0,0051	0,0794	0,0847	0,526	0,1122	0,659
Maximum	0	0,0125	0,1010	0,1050	0,784	0,1782	0,976

Jarillos 14 juillet 1995; Série J

Paramètre (Unité)	pH	tempér. (°C)	MES (g/l)	CE (µS)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO2 (meq/l)
Minimum	7,6	16,8	0,0185	204	0,0144	0,530	0
Moyenne	8,37	17,2	0,0622	210	0,0171	0,658	0
Maximum	8,76	17,6	0,2528	240	0,0187	1,428	0

Paramètre (Unité)	NO3 (meq/l)	F (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Alcalinité (meq/l)
Minimum	0	0	0,0119	0,0289	1,870	0,216	0,933
Moyenne	0	0	0,0140	0,0308	1,930	2,300	1,520
Maximum	0	0	0,0163	0,0346	2,040	2,980	1,640



Confluence Boconó-Burate



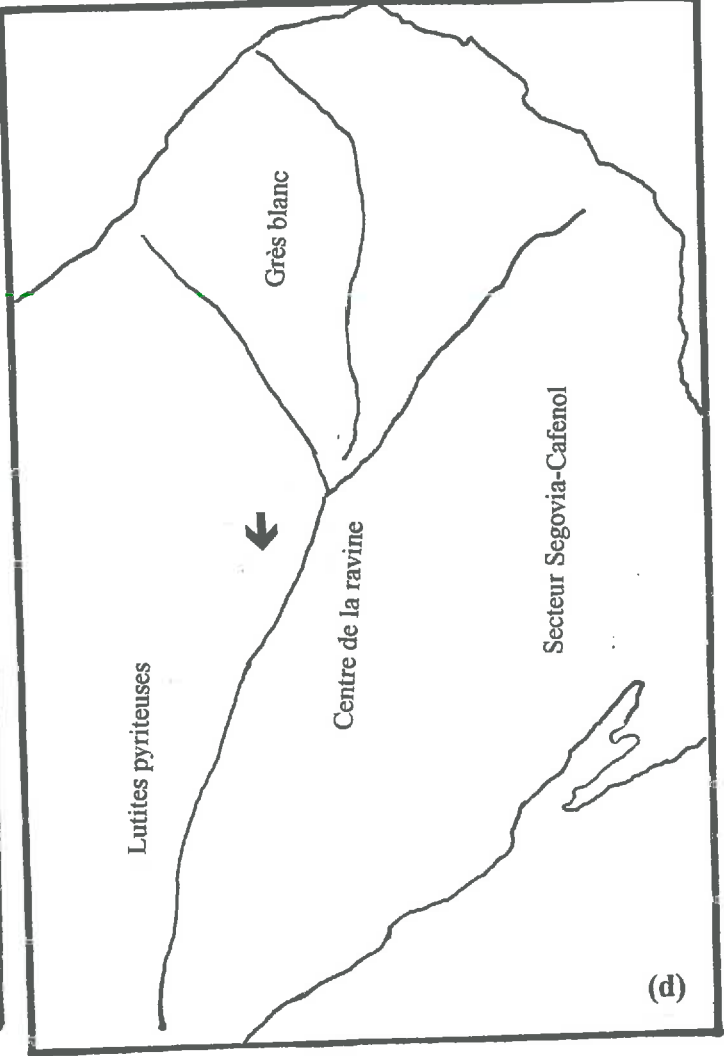
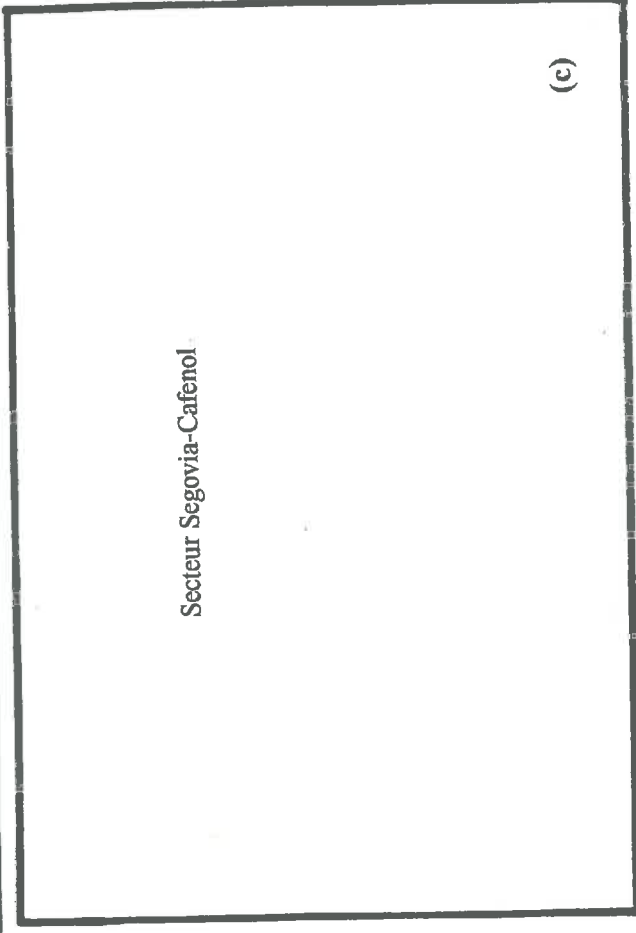
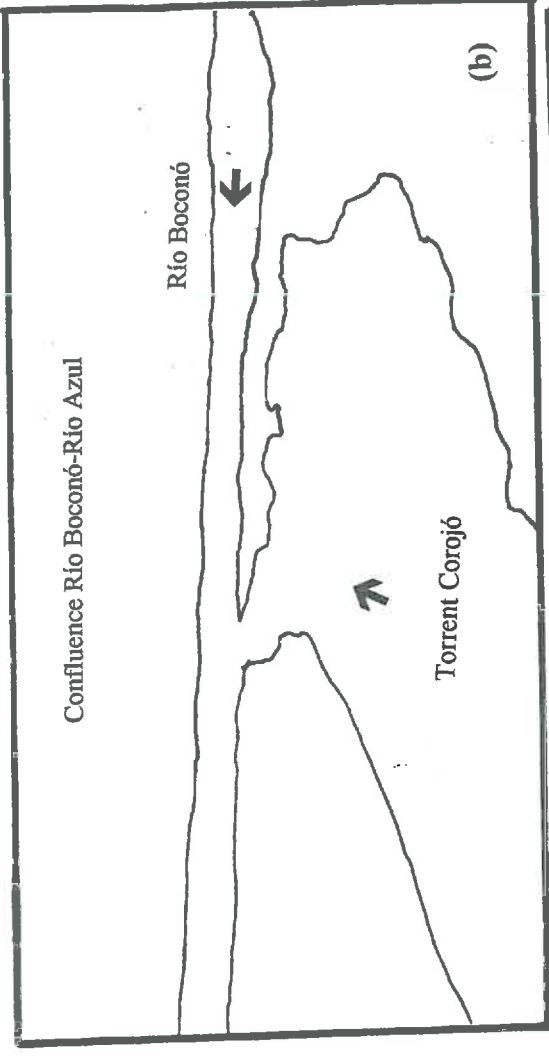
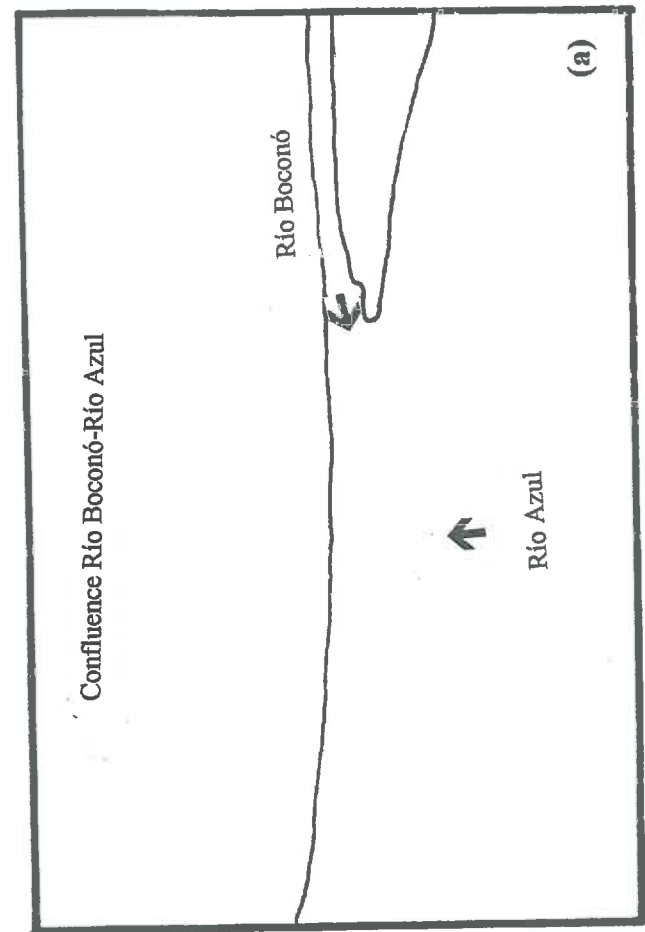
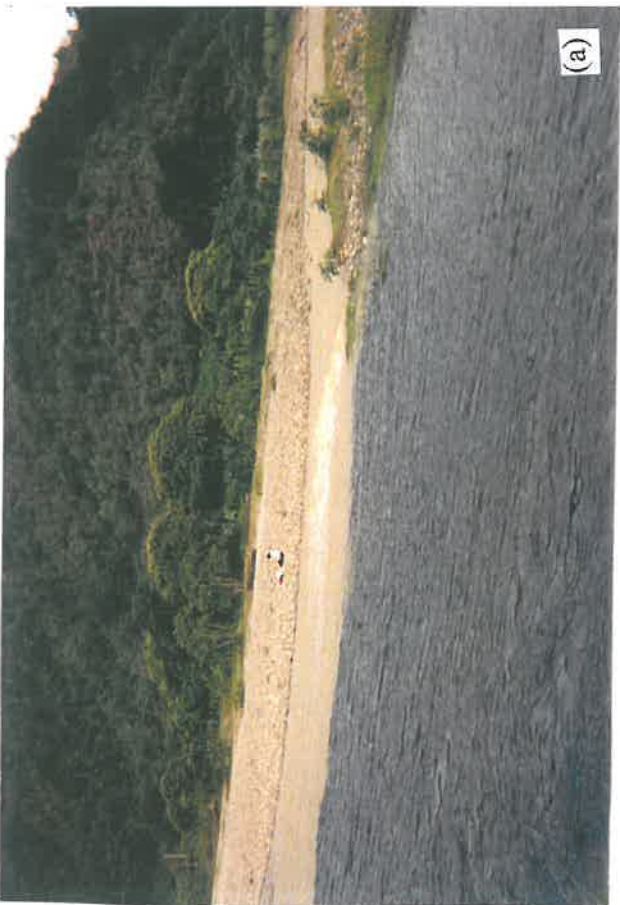
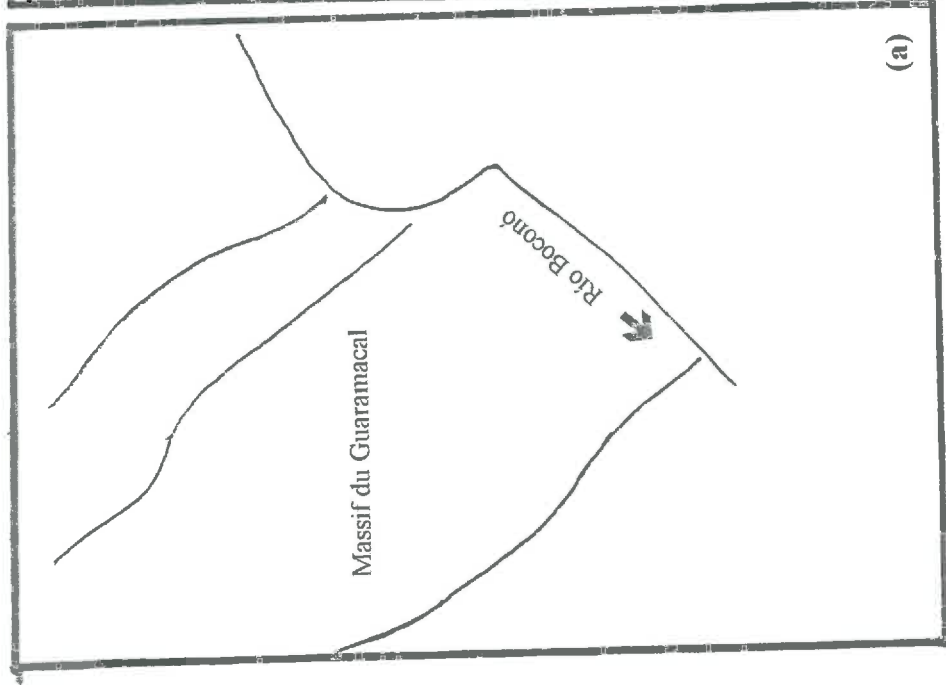
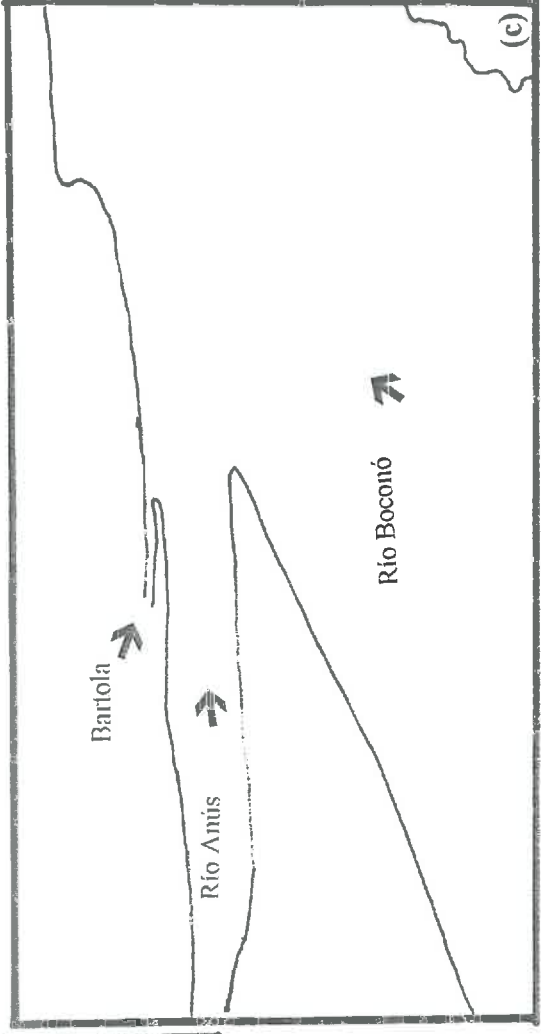
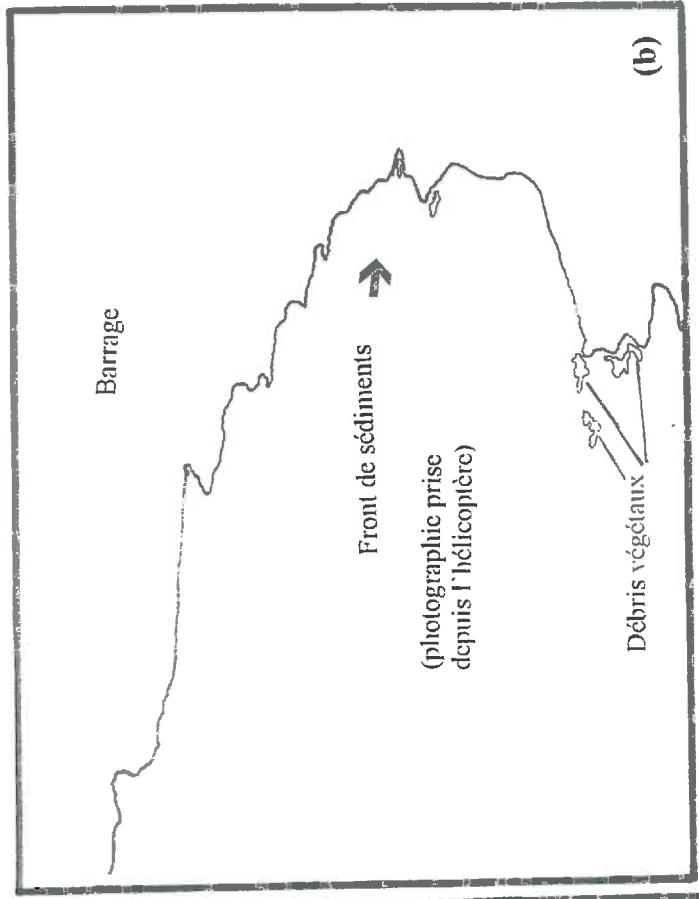
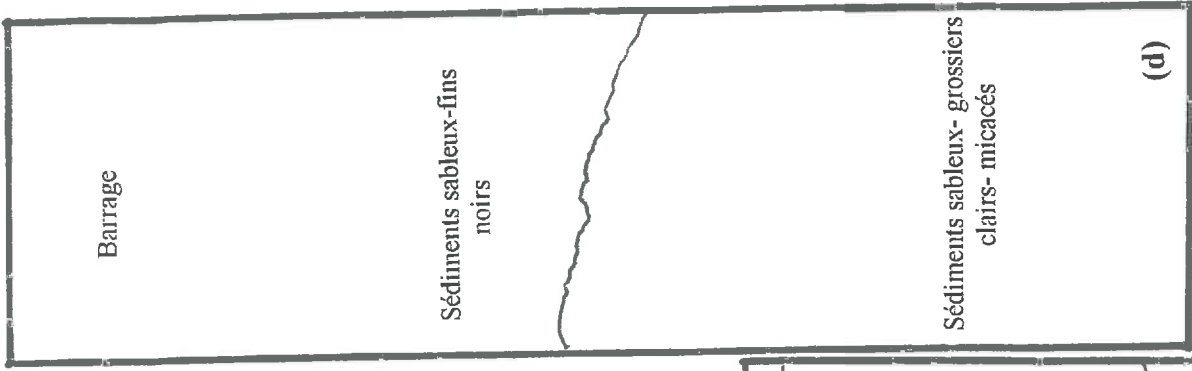


Planche II





Confluence Rio Anis-Rio Boconó-Bartola
dans le massif du Guaramacal

Planche III

