

n° 162
5 microfiches

Robert
GALLAIRE

Thèses et documents microfichés

Hydrologie
en milieu subdésertique d'altitude
Le cas de l'Aïr (Niger)

Fonds Documentaire ORSTOM



010011440

ORSTOM
éditions

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée pour obtenir
le titre de **DOCTEUR EN SCIENCES**
de l'Université Paris XI (arrêté du 30 mars 1992)
spécialité : Sciences de la Terre

par

Robert GALLAIRE

sur le thème:

**HYDROLOGIE EN MILIEU SUBDESERTIQUE
D'ALTITUDE, LE CAS DE L'AÏR (NIGER)**

Soutenue le 27 octobre 1995, devant la Commission composée de:

M. M. STEINBERG,	Président
M. R. GONFIANTINI,	Rapporteur
M. J.C. OLIVRY,	Rapporteur
M. J.F. ARANYOSSY	
M. P. RIBSTEIN	
M. G.M. ZUPPI	Directeur de Thèse

n° 162

5 microfiches



Thèses et documents microfichés



Orstom, l'Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© ORSTOM éditions 1997, Paris

ISSN : 0767-922X

ISBN : 2-7099-1343-7

AVANT PROPOS

Lorsque Jean-Charles Fontes, au printemps 1988, accepta de diriger cette synthèse hydrologique de l'Aïr, il me proposa d'emblée, en complément, une expérience géochimique et isotopique; tant était grand son souci de valoriser ces techniques, dont il présentait justement aussi, en milieu aride, l'intérêt dans la distinction de l'origine des eaux d'écoulement.

Je n'avais alors d'autre connaissance de ces méthodes, que celle d'un enseignement de D.E.A., et je lui fis part de mon souci, qu'il écarta en m'assurant préférer pour cet exercice, un regard neuf et naturaliste, à celui d'un testeur d'équations, fussent-elles de Rayleigh!

Trois ans durant, la base d'Azal, à proximité d'Agadez, qui avait vu se succéder tellement de collègues hydrologues ORSTOM, depuis 1975, chercheurs et techniciens*¹, fut donc le site de mesures et prélèvements, dans le but de mettre en valeur ces techniques, parallèlement aux investigations hydrologiques habituelles.

Mon affectation au Niger comme chercheur ORSTOM, durant près de dix années, et ma charge de cours à l'Université de Niamey à compter de 1982, me donna l'occasion d'échanger avec nombre d'enseignants et de chercheurs d'horizons différents cités en référence; Durand A., Frangi J.P., Joseph A., Moreau C., Morel A., Ousmane B.(UN*²); Newby J.E. (WWF*³); Armand C., Bernert G. (BRGM*⁴); Schroeter P., Balmer F. (IUED*⁵); de missionnaires travaillant sur le milieu; Aranyossy J.F., Bernus E. & S., Gasse F., Guiraud R., Servant M....

**¹ Essayer de les nommer tous, obligerait à dresser un véritable catalogue; l'importance des références bibliographiques concernant les rapports de campagnes est édifiante à ce sujet. On ne saurait cependant passer sous silence les noms de quelques acteurs à l'action particulièrement marquante: R. Lefèvre et M. Roche qui furent les pionniers des actions ORSTOM dans l'Aïr dès 1959 et 1964; M. Hœpffner qui commença en 1974, avec l'aide de P. Legoulven et des équipes techniques G. & J-M Delfieu, et G. Dubée Y. Pépin, une longue suite de conventions avec la coopération allemande (G.T.Z.) agissant pour le Ministère de l'Hydraulique du Niger.*

C'est dans ce cadre que j'opérai moi-même à partir de 1982 et jusqu'en 1990 avec l'aide d'autres collègues: P. Ribstein, Ch. Bouvier, J-P. Bricquet, R. Tehet, M. Gréard, et un nombre important d'aides techniques saisonniers ou permanents parmi lesquels on doit souligner le rôle joué par Ouini Mohamed, l'homme à tout faire d'Azal; gardien, mais aussi observateur de stations météo et hydrométrique qui, à partir d'un simple bagage primaire, mais ayant parfaitement compris le but des opérations, fut capable de bien des initiatives judicieuses au cours des campagnes successives.

**² Université de Niamey*

**³ Fond mondial pour la nature*

**⁴ Bureau de Recherche Géologique et Minière*

**⁵ Institut Universitaire (suisse) d'Etudes pour le Développement*

Le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique (LHGI), que dirigeait à Orsay J-Ch Fontes, fut naturellement la base arrière où, à mon retour du Niger, s'effectuèrent les analyses et réflexions de ce travail.

Je dois à Annick Filly, Ingénieur, responsable du laboratoire, à Sophie Maurice-Pageau et Marc Massault techniciens, la pratique des isotopes et la bonne utilisation des spectromètres de masse atomique. L'équipe de thésards et stagiaires, très cosmopolite, qui reflétait bien les nombreux contacts et associations de travail que J-Ch. Fontes avait par le monde, me permit d'acquérir la plupart des autres techniques d'analyse géochimiques.

Je dois en particulier à T. Gargoury et M. Krimissa la pratique de la chromatographie ionique en phase liquide, à R. Nitjchoua la pratique de la granulométrie fine au coulter laser.

Au cours de mes deux premières années de présence à Orsay je traitai donc, dans une large mesure, l'important dossier analytique constitué sur le terrain de 1988 à 1990, que R. Tehet m'avait aidé à mettre sur pied et à défricher dès son retour du Niger en 1989. Cette collaboration eut pour fruit, en 1990, une première communication au XXII^e congrès AISH de Lausanne. Pour des raisons pratiques je dus avoir recours, en fin de programme analytique sur les éléments majeurs, au Laboratoire des Formations Superficielles, dirigé au Centre ORSTOM de Bondy par Francis Sondag, et à l'aide très gracieuse du Laboratoire d'Hydrobiologie Lacustre, dirigé par Paul Blanc à l'INRA de Thonon les Bains.

C'est en 1993 que commença réellement l'exploitation des données; j'eus ma dernière séance de travail avec le Professeur J-Ch Fontes en juillet, ce dernier quittant provisoirement Orsay pour prendre, à l'automne, la direction de la section d'hydrologie isotopique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de Vienne.

Jean-Charles Fontes choisit pour assurer son intérim à la tête du LHGI le Professeur Gian Maria Zuppi, de l'Université de Turin, qui fut l'un de ses premiers élèves, et qui prit tout naturellement le relais à la direction de ma thèse. La première surprise passée, devant l'exubérance méditerranéenne de cet enseignant à la barbe "Michelangelo", je découvris un scientifique de qualité, intuitif et disponible, avec lequel je publiai plusieurs fois au cours des deux années qu'il passa à Orsay. J'ai l'espoir de poursuivre avec lui une collaboration de laquelle l'ORSTOM, par mon intermédiaire, ne peut que se féliciter.

L'empreinte italienne à laquelle J-Ch Fontes devait ses premières expériences isotopiques, s'accrut encore pour moi, début 1994, lorsque le Professeur Roberto Gonfiantini, ami et prédécesseur de J-Ch Fontes à la prestigieuse "Agence" de Vienne, isotopiste mondialement connu, vint dispenser son savoir au LHGI, durant le premier semestre 1994. Ce dernier me fit l'honneur d'accepter d'être l'un de mes rapporteurs.

J-Claude Olivry, Directeur de Recherche ORSTOM, président de la Commission Scientifique d'Hydrologie; qui dirigea mes premiers travaux au Sénégal, qui fut mon "parrain", puis mon Directeur scientifique et mon Chef d'UR, me fit aussi l'amitié d'être mon rapporteur.

Michel Steinberg, Professeur, autorité et figure des sciences de la terre d'Orsay, présida mon jury avec toute la qualité et l'humour qu'on lui connaît.

Je choisis pour examiner mon travail un isotopiste de renom, "ancien de l'Agence", connaissant bien le nord du Niger, J-François Aranyossy, aujourd'hui chercheur à l'ANDRA*⁶, et un collègue hydrologue, Pierre Ribstein, Directeur de recherche ORSTOM, avec lequel j'avais découvert l'Aïr en 1982. Ils me firent, tous les deux, le plaisir d'accepter de participer à mon jury.

C'est le 2 février 1994, que l'on apprit le mortel accident dont fut victime Jean-Charles Fontes sur une piste malienne, à la tombée du jour; au terme d'une mission qu'il effectuait pour les Nations-Unies... Chacun au laboratoire, qui réunissait ce jour là, par le hasard des choses, quelques uns de ses meilleurs collègues et amis étrangers (Edmunds, Gonfiantini, Zuppi...), fut affecté par cette disparition; les "anciens" qui avaient fait un long chemin, déjà, avec lui, et avaient tissé des liens quasi affectifs; comme les jeunes qui le connaissaient moins, mais qui, impressionnés par sa puissance scientifique, réalisaient n'avoir pu exploiter toutes les ressources de l'homme. J'étais entre les deux; ayant connu J-Ch Fontes dans le cadre d'un DEA à Jussieu, je l'avais ensuite revu, presque chaque année, outre-mer. Il m'avait conseillé utilement dans le cadre de mes premières armes hydrologiques, au Sénégal sur le marigot de Baïla, puis plus tard au Niger, avant de devenir mon directeur de thèse. J'avais eu l'occasion de le côtoyer à maintes reprises sur le terrain, et en dehors; A Azel, au retour d'une mission dans l'Aïr ou le Ténéré, lors d'un congrès ou d'une thèse, à bord de ma pirogue sur le fleuve Niger... Moments privilégiés, l'étendue de sa culture, son esprit, la qualité de son expression étant toujours savoureux!

Je dois à Jean-Charles FONTES bien des choix; grâce aussi à l'environnement du LHGI et à la richesse des contacts que j'ai pu y lier avec les permanents [Annick (s), Christelle, Elisabeth, Françoise (s), Jean-Luc, Laurent (s), ...], comme avec les visiteurs de toutes nationalités, ma connaissance et mon travail ont bénéficié d'expériences et de dynamiques nouvelles; ce qui, dans le domaine de la recherche, est essentiel.

Puisse ce qui suit être à la hauteur des espérances!

"Felix qui potuit rerum cognoscere causas "
Virgile (Géorgiques, II, 489)

R.G, novembre 1995

*⁶ Agence Nationale pour les Déchets Radio Actifs

INTRODUCTION

Un double objectif était assigné à ce travail fruit d'une étroite collaboration entre l'ORSTOM et le Laboratoire du Professeur J.Ch Fontes:

– Faire le point de la connaissance des phénomènes régionaux, en synthétisant l'importante masse de données, accumulées au cours des campagnes hydrologiques ORSTOM qui se sont succédées dans l'Aïr durant près de vingt ans,

– Réaliser, dans le cadre des trois derniers hivernages de 1988 à 1990, parallèlement à la démarche hydrologique habituelle, une investigation à caractère géochimique et isotopique sur l'ensemble de l'hydrosphère, qui permette d'apprécier l'apport de ces techniques.

Deux raisons justifiaient l'expérience entreprise en 1988 dans le nord du Niger:

. la connaissance du potentiel des signaux géochimiques, et surtout isotopiques, dans ces milieux arides à forts contrastes; et en ce sens, le système hydrologique de l'Aïr, relevant le plus souvent "du phénomène de toile cirée déversant dans une gouttière remplie de sable" (J.Ch. Fontes), s'apparentait assez bien aux conditions simples et prometteuses d'un laboratoire naturel.

. la faible expérimentation dans ce type de milieu, liée essentiellement aux contraintes logistiques.

Ce mémoire comporte quatre chapitres dont la succession procède d'une démarche simple: à l'analyse conventionnelle quantitative de "l'hydrologie de l'ingénieur", fait suite l'expérience géochimique et isotopique dont était attendue l'information supplémentaire permettant d'estimer les différentes participations aux écoulements du milieu:

Le premier chapitre décrit donc le cadre des différentes manifestations hydrologiques.

Le second étudie les facteurs conditionnels de cette manifestation et, en fonction des chroniques disponibles, il met l'accent sur l'effet de sécheresse reconnu, au sud du Sahara, depuis la fin des années soixante.

Le troisième traite plus particulièrement des transferts de surface, qu'il s'agisse de formes liquides ou solides (Transports de matières en suspension).

Le dernier chapitre introduit la géochimie et les isotopes. Après un bref rappel des principes et conditions de marquage, il développe une application aux différents types d'eaux du milieu, avant de mettre en œuvre, sur quelques crues du Téloua, la technique de séparation des écoulements.

CHAPITRE 1

“LE MILIEU DE L'AÏR”

A. SITUATION ET LIMITES

I. SITUATION:

Un atlas des régions naturelles d'Afrique fait apparaître l'Aïr* comme une excroissance méridionale du proche Hoggard dans l'extrême Sud-Est saharien.

Seul massif montagneux du Niger, il constitue dans le nord du pays un ensemble compact d'environ 60 000 km². Ses plus grandes dimensions, 350 km, sont Nord-Sud entre les parallèles 17° et 20°30'; d'Est en Ouest elles atteignent plus modestement 200 km dans la partie méridionale, à la hauteur du 18^{ème} parallèle, et seulement 100 km au nord du 19^{ème} (fig. 1-A.1, ANNEXE 1-A.I,1).

II. LIMITES:

Sur la carte géologique les contours du massif sont identifiables à la structure; ils correspondent en effet à l'émergence d'un socle cristallin au milieu de dépôts sédimentaires.

Sur le terrain les limites en sont bien visibles à l'Est, où des escarpements dominent fréquemment les sables du Ténéré; elles apparaissent moins nettes à l'Ouest où l'on passe insensiblement des dépôts de couverture, essentiellement gréseux, au socle. Passage d'autant moins net que ces formations présentent indifféremment la même patine noire luisante et le même aspect de reg donné par un recouvrement uniforme de galets de quartz émoussés (Vogt et Black, 1963).

B. CADRE PHYSIQUE

I. DES PAYSAGES À LA FOIS MONOTONES ET CONTRASTES:

Que l'on aborde le massif par le sud ou par l'ouest, qui représentent les voies d'accès normales, on ne peut être que surpris par les paysages de l'Aïr. Ces derniers n'offrent en effet durant plusieurs dizaines de kilomètres de pénétration, dans un monde presque exclusivement

* Terme berbère dont l'origine remonterait, selon Suzane Bernus traduisant H. Barth (1850), au X^{ème} siècle, lorsque la pression touarègue se fit plus pressante sur les populations noires gobérawa, dont le territoire portait jusque là le nom d'Azbine (terme encore employé sur certaines cartes).

minéral, que des surfaces subhorizontales, seulement marquées, ici et là, par quelques molles collines ou arrêtes filoniennes délabrées, en dos de dinosaures.

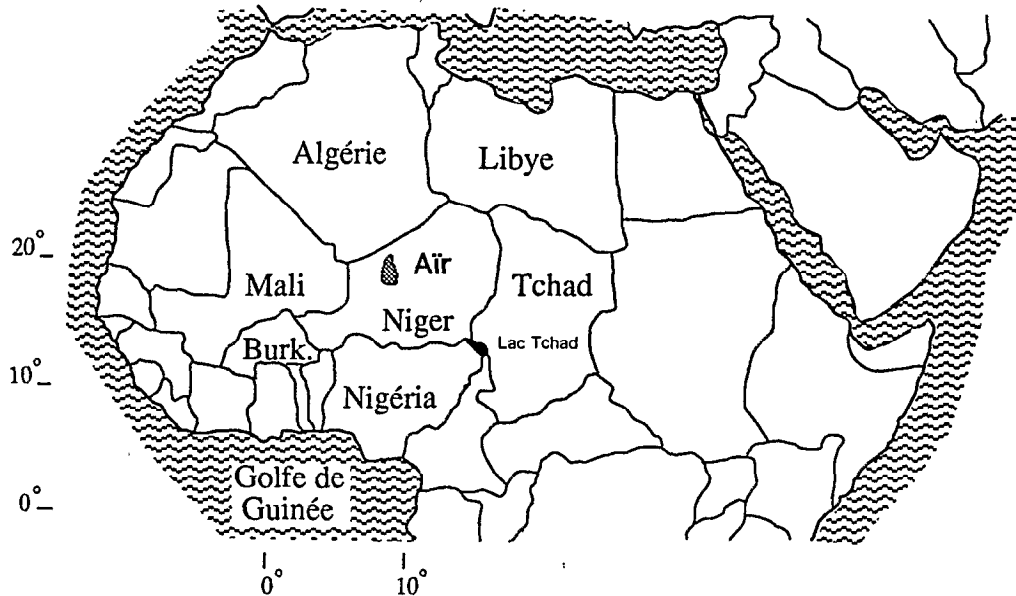


Fig. 1-A.1 Situation de l'Air

Ces surfaces caillouteuses sont entaillées de ravines, dont le réseau hiérarchisé, et la profondeur croissante à l'approche du niveau de base du collecteur local, oblige la piste à circonvoluer, rendant laborieuse la pénétration du massif.

Les couleurs elles-mêmes tendent à donner à ce monde ruiniforme un aspect lunaire:

On passe de l'ocre-jaune des coupes du manteau d'altération par les ravines à toute la gamme des gris (regs gneissiques), jusqu'aux couleurs sombres des blocs granitiques (tors) patinés et des coulées basaltiques.

Les lits des Koris (collecteurs principaux) s'inscrivent généralement, par une berge franche de quelques décimètres à quelques mètres, dans cette surface (fig.1-A,2). Le fond plat et sableux des lits mineurs, de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de largeur, est bordé d'une terrasse argilo-sableuse colonisée par une végétation arborée essentiellement épineuse. Le lit majeur, lorsqu'il existe, est occupé par quelques autres espèces arbustives et arborescentes vivaces. Cette végétation de bordure des koris constitue la seule tache verte dans le paysage. D'autant plus contrastée, à distance, que seuls généralement les houppiers affleurent la surface du socle.

A la faveur de dépôts alluvionnaires, et de lits majeurs plus importants, de véritables oasis se sont développées, qui regroupent une bonne partie de la population locale, et dont les noms sont familiers aux utilisateurs des quelques pistes de l'Air: Aoudéras, Elméki, Tabelot, Timia, Iférouane...

Cette monotonie des paysages est rompue au coeur du massif par l'apparition de cônes volcaniques (tel celui de Tabadabat, sur la piste de Tabelot, venant d'Agadez), ou l'intrusion de

structures massives à aspect plus ou moins tabulaires (Bagzanes) ou volcaniques (mont Todgha). L'approche de ces structures permet de mieux réaliser que l'on vient de pénétrer un massif. Ces reliefs dominant de quelques dizaines de mètres (comme le Tabadabat) à quelques centaines (Bagzanes; 500 à 600 m) voir plus (mont Todgha; plus de 1000 m) les surfaces environnantes.

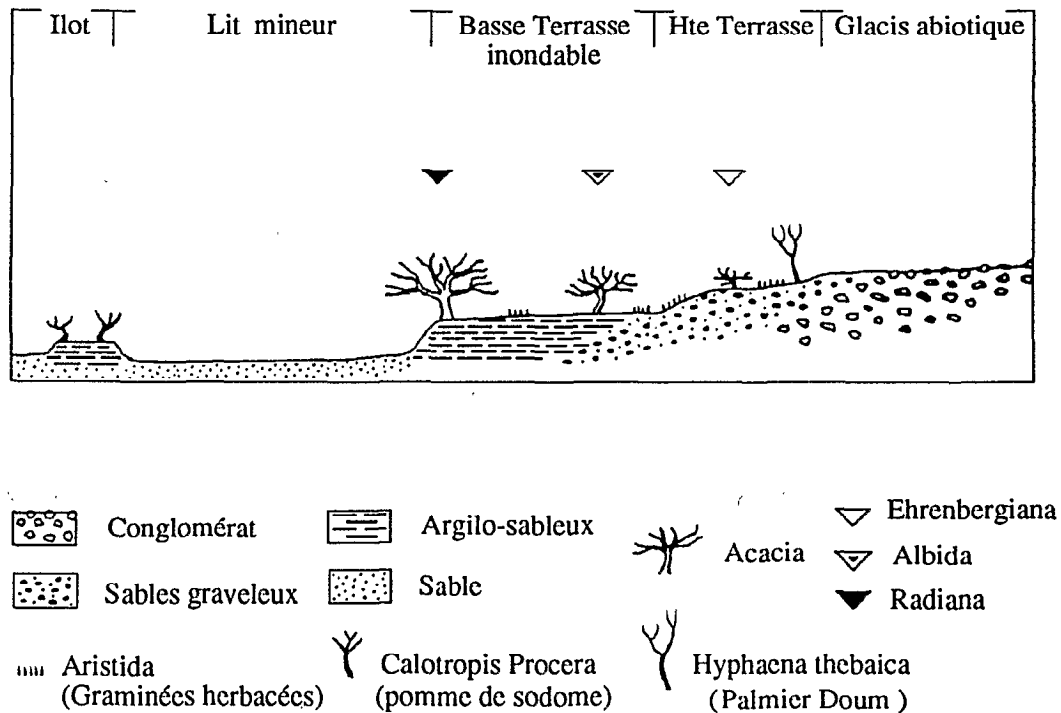


Fig. 1-A,2 Coupe type des lit et berge des Koris de l'Air

Enfin l'aspect irréel des paysages est encore renforcé durant plusieurs mois de l'année par la persistance de brumes sèches. Le milieu naturel semble donc fortement dépendant, à la fois, du contexte géologique et des conditions climatiques.

II. LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE:

1) L'histoire géologique de l'Air:

Elle fait partie de l'histoire de la structure Ouest-Africaine (Furon, 1960). La notion de grand bouclier ouest-Africain est remplacée, depuis 25 ans environ, en fonction des progrès de la connaissance (G. Rocci, 1965; Karche et al., 1976; C. Moreau, 1982...), par celui d'une mosaïque de blocs reliés entre eux par des ceintures plissées.

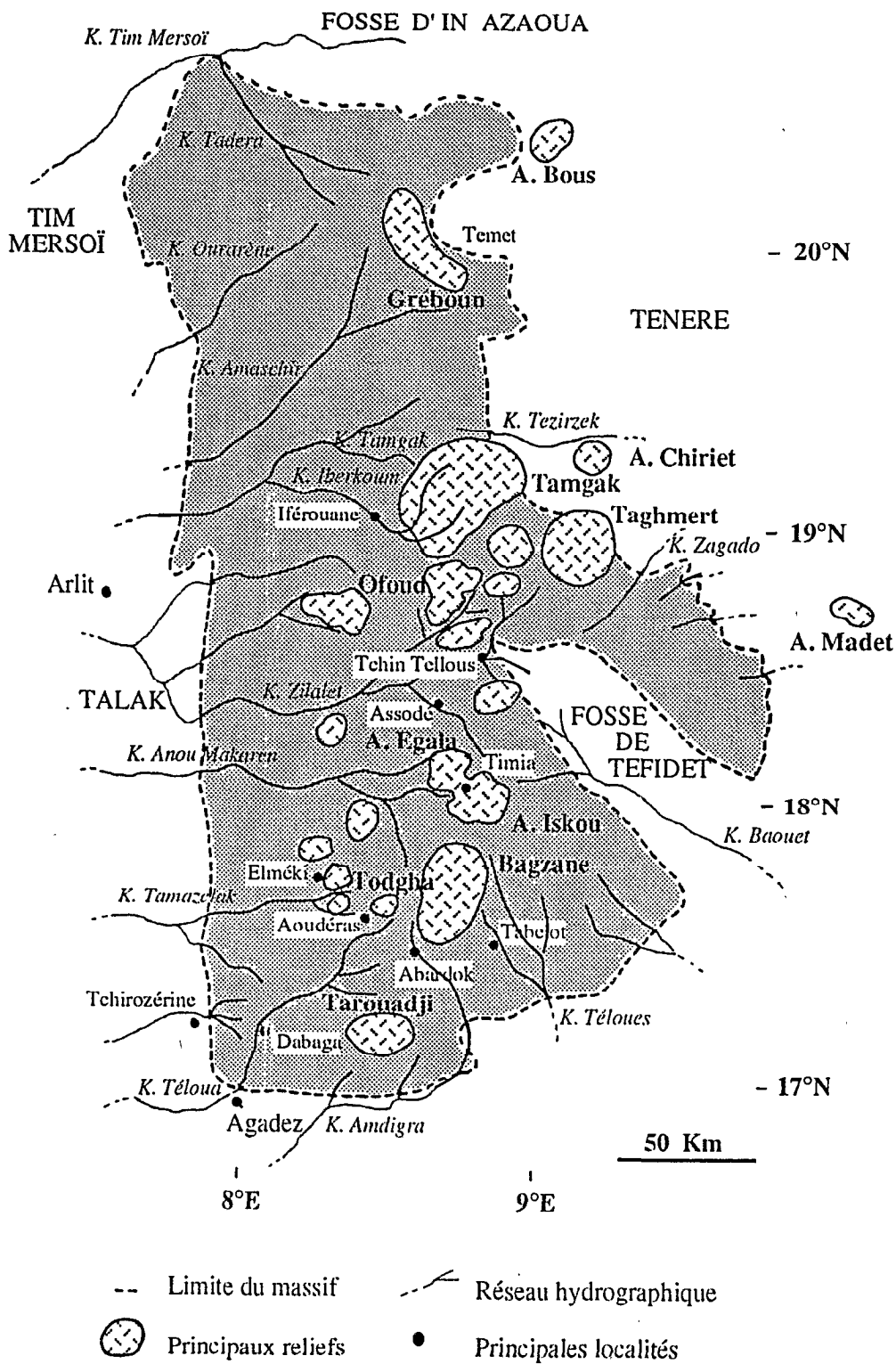


Fig. 1-A.3 Réseau hydrographique, principaux reliefs et localités de l'Air

On distingue donc actuellement trois grandes unités en Afrique occidentale:

- un craton à l'Ouest,
- des bassins sédimentaires (d'W en E; Taoudeni, Iullemeden et Tchad),
- des zones mobiles, encore appelées "chaînes pan-Africaines" par certains auteurs

(Black et al, 1967; Black, 1978), en raison de mécanismes de formation, comparables à ceux des chaînes alpines, dont l'origine serait l'affrontement de deux plaques;

- . l'une passive à l'ouest : le craton w-africain,
- . l'autre active à l'est : le bouclier touareg de la zone mobile.

Comme le Hoggar et l'Adrar des Ifoghas, l'Aïr ferait partie de cette zone mobile dont la compression au contact du craton W-africain aurait provoqué, lors de la phase active de l'orogénèse pan-africaine, de - 650 à - 450 millions d'années (Black, 1978; Morel, 1984; Karpoff, 1965):

- . un métamorphisme général rajeunissant les gneiss anciens,
- . l'apparition de phénomènes intrusifs granitoïdes,
- . le rejeu d'anciennes failles et la création de nouvelles,
- . le développement d'une intense érosion dont seraient issues les

formations molassiques du Proche-Ténéral à l'Est du massif, et la sédimentation du bassin du Tim Mersoï qui sépare l'Aïr du Hoggar au Nord et à l'Ouest.

Immédiatement après la période pan-africaine, des mouvements contemporains de l'orogénèse calédonienne médiane, entre l'Ordovicien inférieur (- 480 millions d'années) et le silurien supérieur (- 400 millions d'années), auraient entraîné la mise en place (Karche, 1978; Morel, 1984), à l'emporte pièce (Black, 1978; Moreau, 1982) des complexes subvolcaniques à structure annulaire responsables des grandes discordances du massif.

Postérieurement, de nouveaux mouvements se seraient produits (Moreau, 1982) au moment des orogénèses Acadienne (- 350 millions d'années) et Hercynienne (- 200 millions d'années), dont les conséquences auraient été la mise en place des "Younger granites", une reprise intense de l'érosion, et la formation de nouvelles séries sédimentaires.

Au secondaire s'effectuent d'importants dépôts continentaux (au Jurassique se situe la base du Continental Intercalaire) et marins (transgression sur l'Aïr au Crétacé). La fin du secondaire, au moment des plissements Alpin et Atlasique (- 80 millions d'années) aurait été marquée par d'importants rejeux tectoniques, dont serait issu le fossé de Téfidet; le soulèvement général du massif ayant entraîné par ailleurs le décapage d'une grande partie de sa couverture sédimentaire (fig. 1-A.3).

Du tertiaire au quaternaire récent, la zone mobile connaît de nouveaux mouvements et une série d'émissions volcaniques que l'on retrouve dans le sud de l'Aïr autour du mont Todgha (Karche, 1979) et en bordure occidentale du fossé de Téfidet.

Ces mouvements occasionnent une reprise intense de l'érosion qui produira sur le pourtour du massif les sédimentations du Continental Terminal.

Après une période fini-tertiaire (Mio-Pliocène) relativement calme, les mouvements reprennent, ainsi que l'érosion, au Quaternaire. D'importants dépôts fluviaux ont lieu; c'est à ,

cette époque essentiellement que sont façonnées les vallées de l'Aïr, que sont étagés les glacis et les terrasses visibles actuellement dans le paysage, dont les derniers remaniements ont moins de dix mille ans (Rognon, 1975, 1976, 1980, 1981). Ainsi, les mouvements semblent avoir été permanents tout au long de l'histoire géologique de l'Aïr. Les structures ayant maintes fois rejouées, la morphologie actuelle apparaît donc porteuse, dans bien des cas, d'un très long héritage.

2) Les grandes unités géologiques du massif;

Elles sont au nombre de quatre et apparaissent nettement (Raulais, 1957, 1959; Greigert et al., 1967) sur la carte comme dans les paysages (fig.1-A.4: schéma géologique de l'Aïr, d'après Moreau, 1982).

a) Le socle:

Il est issu directement du bouclier Touareg et représente les 9/10 de la superficie du massif. Les formations métamorphiques plissées, très anciennes, qui le constituent, ont été partiellement rajeunies et marquées par des phénomènes intrusifs magmatiques.

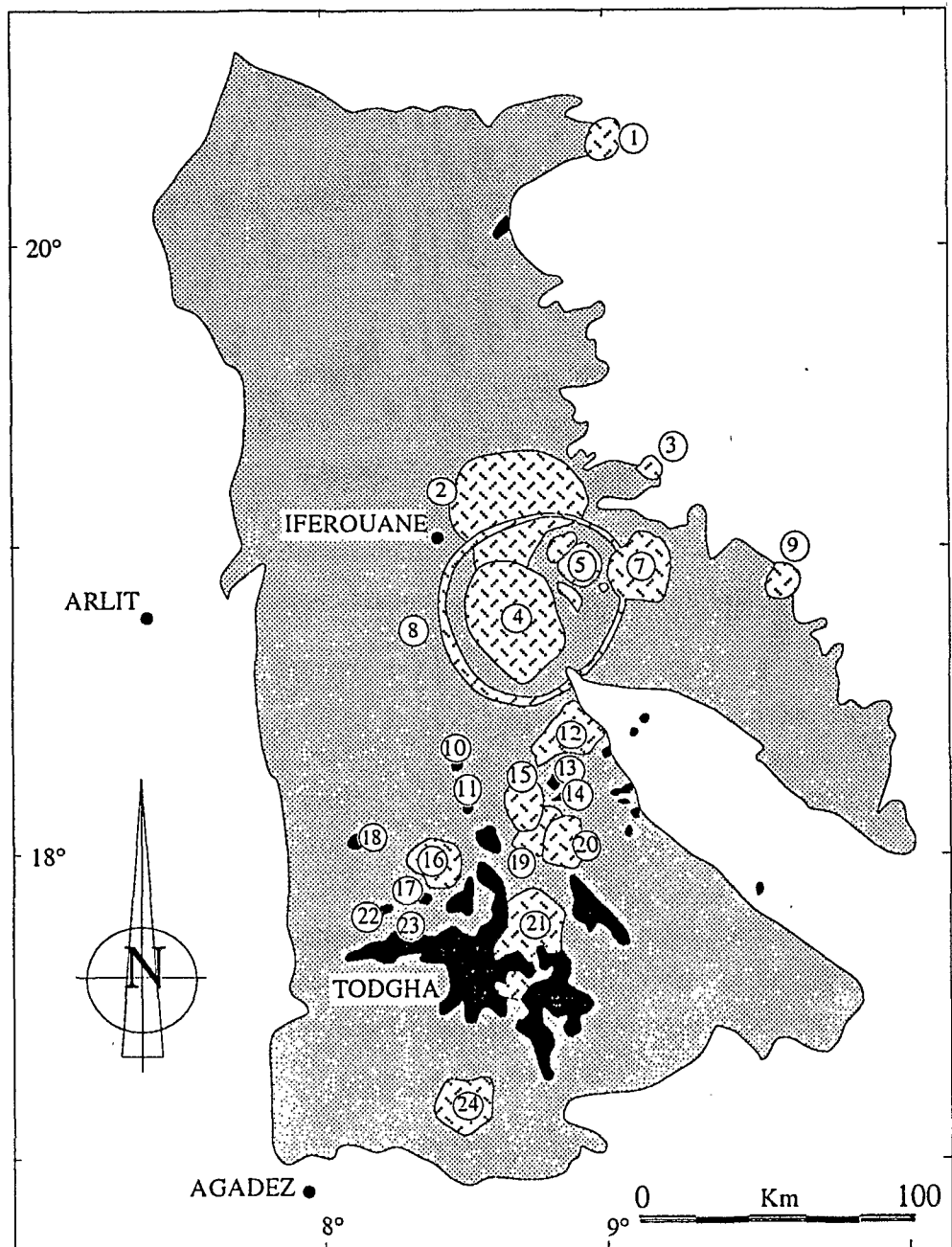
– L'ensemble métamorphique présente un bombement dissymétrique, l'axe anticlinal Nord-Sud étant légèrement déporté vers l'Est. On retrouve dans ses formations gneissiques ou schisteuses, toutes fortement plissées, cette direction isoclinale Nord-Sud et divers degrés de migmatisation. Les contraintes Est-Ouest, qui se sont prolongées au delà de la phase de poussée isostatique de la chaîne, expliquent le réseau serré de failles verticales, d'orientation générale NW-SE, à décrochements senestres des compartiments Nord.





– Les formations magmatiques qui recoupent le socle métamorphique sont essentiellement représentées par des granites qui couvrent près de 30 % de la superficie de l'Aïr. Ces affleurements, qui datent du pré-Cambrien, ne représentent cependant jamais des massifs de grandes dimensions. Ils apparaissent fréquemment sous forme de batholites allongés suivant la direction générale Nord-Sud du plissement (Black et al, 1967). Ces batholites sont particulièrement bien visibles dans la région de Dabaga qui a donné son nom à ces granites anciens. Mais on les rencontre aussi sous formes post-tectoniques, en remplissage de failles (forme filonienne), ou dans le Sud-Ouest de l'Aïr en petits massifs.

La transition entre les formations métamorphiques et magmatiques se fait donc soit de façon très nette, lorsqu'il s'agit de phénomènes intrusifs utilisant les accidents de structure, soit de façon progressive, lorsqu'une migmatisation a pu se développer.

– Vers l'Est la dissymétrie dans le bombement du socle accentue le pendage des couches qui plongent avec un angle de 4 à 5 degrés vers le Ténéré. Ces couches portent, en discordance, une molasse issue de la désagrégation même du socle dans laquelle on retrouve à la fois des conglomérats grossiers et des grauwackes.

Le nom de " formations du Proche-Ténéré " a été donné à cet ensemble.



- | | |
|---|---|
|  1 Socle indifférencié |  3 Couverture sédimentaire |
|  2 Structure annulaire |  4 Volcanisme récent |

- | | | | |
|--------------|---------------|------------|---------------|
| 1 Bous | 2 Tamgak | 3 Chiriet | 4 Ofoud |
| 5 Imaghlane | 6 Tagueï | 7 Taghmert | 8 Meugueur |
| 9 Arakao | 10 Abontorok | 11 Tagha | 12 Goundaï |
| 13 In Taïnok | 14 Manouaroun | 15 Egalah | 16 Bilet |
| 17 Agadao | 18 Rouraouet | 19 Aroyan | 20 Iskou |
| 21 Bagzane | 22 Guissat | 23 Elméki | 24 Taghouadji |

Fig. 1-A.4 Schéma structural de l'Aïr (d'après Moreau, 1982)

b) Les complexes subvolcaniques:

C'est l'existence de ces complexes à structure annulaire qui a fait l'originalité géologique de l'Aïr. Au nombre d'une vingtaine, ces structures recoupent donc le socle, selon les termes de Moreau (1982) "à l'emporte-pièce". Agglomérées en grappes au centre-Est du massif, elles résultent de l'intrusion de roches alcalines et hyperalcalines dont l'âge serait (d'après les travaux de Karce et Vachette, 1978) de plus en plus récent vers le sud, couvrant toute la période primaire de l'Ordovicien et du Silurien.

Reprenant en partie Black (1978) et Moreau (1982), Morel en 1984 distingue trois grands types de structures annulaires en fonction de leur pétrographie et de leur morphologie:

– Les massifs plutoniques de type Bagzan, essentiellement granitiques, de formes massives et tabulaires, qui atteignent souvent plusieurs centaines de km² (Bagzan 600 km², Tamgak 1000 km²).

– Les massifs volcaniques type Goudaï, souvent constitués d'accumulations de laves acides (rhyolite, dacite) reconditionnées à chaud (ignimbrites) présentent encore des formes massives et tabulaires, mais les surfaces sommitales apparaissent nettement moins importantes; Goudaï 150 km², Bilet 100 km².

– Les massifs à anneaux concentriques, type Ofoud, présentent une grande variété pétrographique et par la même des formes beaucoup plus contrastées. Les superficies concernées sont aussi très variées; Ofoud 900 km², Aroyan 60 km², Abontorok 6 km².

c) Le volcanisme récent:

Ses manifestations au Tertiaire et au Quaternaire sont liées aux derniers mouvements de la zone mobile qui ont pour conséquence dans le sud de l'Aïr, comme dans un certain nombre de régions Ouest et Centre africaines (Hoggar, Tibesti, plateau de Jos au Cameroun), une série d'émissions volcaniques et de mouvements tectoniques.

Au Niger les mouvements du socle se traduisent dans l'Aïr par l'effondrement de Téfidet, et par l'émission, à sa bordure nord-occidentale, à la faveur du rejeu des failles pré-existantes NW-SE, de matériaux éruptifs de type alcalin.

Deux types d'émissions se seraient produites d'après Morel (1984) et Karce (1979):

– des explosions et extrusions de trachytes et de phonolites; une trentaine de manifestations recensées,

– des épanchements basaltiques; 130 environ, qui couvrent plus de 1000 km² et dont les manifestations les plus récentes, dans la région du Todgha et des Bagzanes, pourraient être d'époque historique.

Ainsi, au sud des Bagzanes, la piste d'Elméki à Tabelot franchit une coulée basaltique de 3 à 4 mètres d'épaisseur et de quelques centaines de mètres de largeur, installée sur des dépôts de couverture argilo-sableux, qui semble être d'une particulière fraîcheur.

d) Les formations sédimentaires;

On les rencontre essentiellement en bordure du massif, mais aussi à l'intérieur. De nature et d'âge divers elles témoignent de la très longue histoire de l'Aïr.

Sur la bordure Ouest de l'Aïr (bassin de Tim Mersoï), Valsardieu (1971) a distingué toute une série de séquences sédimentaires de grande importance comprenant trois étages:

– A la base des matériaux grossiers allochtones de type conglomérat (galets cristallins, quartzites, rhyolites, micachistes, ignimbrites...) en provenance souvent de paléoregs du socle dont les éléments ont été mobilisés et consolidés plusieurs fois de suite, ce qui explique le degré d'éroussé des galets. Ces matériaux attestent donc de périodes d'érosion très actives.

– Au dessus de ces éléments grossiers une ou plusieurs formations gréseuses signalent un travail d'érosion nettement moins actif.

– Enfin au sommet des horizons fins de type argileux qui ne peuvent correspondre qu'à une forte diminution du potentiel érosif liée à un changement climatique, un mouvement subsident, et ou un passage à une sédimentation de type lacustre ou marin.

Ainsi, les formations sédimentaires qui se succèdent de la base du primaire à la fin du secondaire permettent de reconstituer, en grande partie, l'histoire des formes de l'Aïr.

Elles témoignent en tout état de cause de la présence continue de reliefs et de structures proches de ceux du massif actuel; contrairement au Hoggar dont la structure n'est apparue progressivement qu'à partir du tertiaire, comme le montrent les travaux de Rognon (1967) Girod (1971) et Karpoff (1965).

3) Le rôle des failles et des fractures;

La tectonique cassante n'intervient vraiment dans l'Aïr qu'après la cratonisation des formations Pan-Africaines (~ 500 M.a.). Elle va se poursuivre jusqu'au quaternaire avec les conséquences que l'on sait :

- Effondrements (fossé de Téfidet),
- mise en relief de structures annulaires (Bagzanes...)
- voies de pénétration pour les phénomènes filoniens, pour le volcanisme,
- influence sur le tracé du réseau hydrographique...

Trois grandes directions de fracturation sont observables d'après les travaux structuraux de Black et al. (1967):

– La première et la plus importante en fréquence correspond aux grandes directions communes à toute l'Afrique de l'Ouest : N/NW - S/SE. Cet axe est celui des grands plissements et des structures annulaires. Les accidents de cette direction ont joué un rôle de premier plan dans l'évolution de l'Aïr.

– La direction E-W est surtout visible dans le centre du massif; c'est là que le réseau hydrographique apparait le plus influencé; koris Tamazelak, Anou Makaren, Zilalet... (fig. 1-A.3)

– Les directions N/NE, E/NE sont souvent celles des rejeux post-Crétacé qui ont aussi influencé le cours des écoulements et qui ont servi de voie au volcanisme plio-quadernaire dans le Sud et l'Est du massif; koris Zagado, Amdigra, Téloua..... (fig.1 -A.3).

III. CONTEXTE CLIMATIQUE:

Compte tenu de sa situation continentale au cœur de l'Afrique de l'Ouest, de sa position sud-saharienne entre les déserts du Tamesna et du Ténéré, correspondant une grande partie de l'année aux hautes pressions subtropicales, l'Aïr appartient à la zone sub-aride (Leroux, 1983-1987; Charre, 1974; Dubief, 1959-1960; Griffiths, 1972).

Néanmoins, malgré cette position géographique très défavorable, le massif semble pouvoir régénérer, par son importance et son altitude, un certain nombre de masses d'air issues, en période estivale, du phénomène de mousson de secteur sud (fig.1-A.6).

Il s'ensuit chaque année sur l'Aïr, au moment de l'hivernage, des précipitations dont le caractère toujours orageux, la répartition très inégale, et les quantités aléatoires, signent bien l'appartenance du massif au milieu subdésertique.

1) Le point sur les mécanismes aérologiques intertropicaux:

a) Le bilan radiatif; Dhonneur (1978 -1985)

Les déséquilibres énergétiques sont à l'origine des grands mouvements dans la troposphère.

$$Q = (S + H) (1 - a) - (E - G)$$

où Q est le bilan radiatif,

S : le rayonnement solaire direct,

H : le rayonnement diffus (réémis par l'atmosphère et les nuages),
a : l'albédo,
E : le rayonnement de grande longueur d'onde émis par la terre,
G: la rétroaction par l'atmosphère de E vers la terre.

Aux latitudes intertropicales le bilan radiatif est positif; le sol reçoit plus d'énergie qu'il n'en renvoie (Leroux, 1983).

Ce bilan radiatif induit un transfert vertical d'énergie (chaleur sensible, chaleur latente, quantité de mouvement); mais sa variation au sol induit aussi un transfert d'énergie horizontal. Ces différents transferts vont s'effectuer grâce au mouvement des masses d'air dont il existe donc deux grandes composantes dans la stratosphère:

- Une composante méridienne liée au bilan thermique excédentaire équatorial,
- Une composante zonale liée au différentiel thermique océan - continent.

b) La circulation méridienne:

Elle est liée à deux moteurs; l'un est intertropical, l'autre est polaire:

– Dans la zone intertropicale (ZIT) le bilan radiatif, excédentaire au sol, engendre un fort mouvement convectif de l'air réchauffé qui peut monter jusqu'à 18 km, limite de la tropopause à ces latitudes. Ces vives ascendances (autrefois appelées cheminées équatoriales) créent au sol une bande dépressionnaire qui représente l'équateur météorologique. Dans les hautes couches ce dernier se confond avec la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC), alors que dans les basses couches il s'inscrit dans un plan incliné; le Front Inter Tropical (FIT).

En altitude le refroidissement des masses d'air entraîne une condensation et la formation de nuages. Mais les ascendances occasionnent aussi un tassement des masses d'air qui génèrent de relatives hautes pressions et un écoulement méridien d'altitude vers des pressions relativement moins élevées.

– Au pôle le bilan thermique est déficitaire, ce qui entraîne à l'inverse de la ZIT un mouvement advectif des masses d'air d'où résultent:

- .de hautes pressions au sol qui constituent un potentiel de coulées méridiennes de basse altitude;
- .de basses pressions en altitude qui constituent un appel méridien pour les masses d'air plus denses.

Ainsi donc se génèrent dans chaque hémisphère les cellules polaires et les cellules tropicales de *Hadley*. Entre les deux, la zone tempérée constitue un milieu tampon qui possède sa propre cellule, dite de *Ferrel*, alimentée au Nord et au Sud par les deux cellules encadrantes.

La circulation méridienne atmosphérique, au sein de la troposphère, se fait donc essentiellement par l'intermédiaire de trois cellules qui s'interconnectent entre elles dans une modélisation de type *Palmen*, reprise par Dhonneur en 1978.

Au sol cette circulation méridienne se traduit par l'action des vents; composantes horizontales des transferts de masses d'air résultant des gradients de pressions, de l'accélération de Coriolis (vers la droite dans l'hémisphère nord), des forces centrifuges résultant de ce dernier effet, et des forces de frottement atmosphériques et terrestres qui entravent sa progression.

Dans la ZIT deux types de courants apparaissent essentiels pour expliquer les grandes composantes climatiques locales:

– Au Nord, l'Alizé boréal prend naissance dans l'anticyclone des Açores qui correspond à la zone de subsidence nord des masses d'air de la cellule de *Hadley*. Faible et méridional en hiver cet anticyclone produit des vents (représentant la branche inférieure de la cellule de *Hadley* Nord) qui s'enroulent autour de lui dans le sens des aiguilles d'une montre. D'abord humide sur l'océan cet alizé va s'assécher sur le continent Nord-Africain en gravissant le versant Ouest de l'Atlas marocain, puis se refroidir en redescendant sur le versant Est, avant de se réchauffer sur le Sahara qui va lui donner toutes les caractéristiques d'un alizé continental chaud et sec; c'est l'Harmattan qui souffle du Nord-Est sur le Sahel durant six mois environ de novembre à avril.

– Dans l'hémisphère sud, l'alizé austral est issu de l'anticyclone de Saint Hélène qui, comme son homologue des Açores, est disposé sur l'Atlantique. De même il représente la branche inférieure de la cellule de *Hadley* Sud. Cet alizé marin qui s'enroule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de son anticyclone a donc une composante Sud-Est. Mais en raison de la position septentrionale de l'équateur météorologique au cours de la période estivale, cet alizé va déborder l'équateur géographique et à cette occasion s'infléchir vers le Nord-Est en s'enrichissant encore en humidité à la traversée du golfe de Guinée; cet alizé dévié très humide peut alors prendre le nom de Mousson.

c) La circulation zonale;

Elle a été mise en évidence par Walker (1972) qui a souligné, en milieu tropical, le rôle du différentiel thermique entre les zones océaniques fraîches à l'Ouest et celles plus chaudes des continents à l'Est.

Les régions chaudes continentales favorisent les ascendances, donc la condensation et la formation de nuages en altitude, mais aussi la constitution de zones dépressionnaires attractives à la surface du sol. Le milieu frais océanique favorise la subsidence des masses d'air, la disparition des nuages et la création de hautes pressions de surface qui seront attirées par les zones dépressionnaires continentales précédentes. Il s'ensuit donc la formation de cellules

zonales dites de *Walker* dont le courant inférieur est orienté W-E, le courant supérieur fonctionnant en sens inverse.

La circulation inférieure serait renforcée par la présence sur la côte ouest des continents de phénomènes d'Upwelling (remontées d'eaux froides) venant amplifier le différentiel thermique océan-continent (Citeau et al., 1985, 1986).

– La branche supérieure de la cellule de *Walker* au dessus de l'Afrique de l'Ouest constitue un courant " Jet " dont la vivacité n'est pas celle des Westerlies (25 km/h) appelé Jet d'Est Tropical (**JET**) dont l'action se situe à environ 250 hPa (entre 150 et 300 hPa). Son existence pourrait aussi être liée à un courant d'altitude dont l'origine serait l'écart estival entre les hautes pressions d'altitude tibétaines et les basses pressions océaniques indiennes. Ce courant Jet contient de l'eau qui, à cette altitude, se présente sous forme de cristaux de glace, et qui résulterait d'un mélange originaire de l'océan indien (De Félice et al.,1982), du golfe persique (Benson et Rao,1987), et peut-être de la reprise de cumulonimbus générés par les lignes de grains (Desbois et al., 1988; Peters et al., 1989)

– La branche inférieure de la cellule de *Walker* représente la composante Ouest de la mousson venant renforcer l'effet de l'alizé austral.

Mais il existe une autre composante au flux d'Est; c'est le Jet d'Est Africain (**JEA**) dont l'action se situe à une altitude plus faible; 600 hPa. (potentiellement entre 850 et 350 hPa, d'après Tetzlaff et Peters, 1986) et dont l'origine est encore discutée:

Selon Fontaine et Pérard (1986) il résulterait principalement de l'inversion du gradient thermique méridien dans les couches moyennes (vers 600 hPa) entre le Tchad et le Sénégal; la cellule de *Hadley* nord (**CHN**) plus chaude surplombant à cette altitude la cellule de *Hadley* sud (**CHS**) plus fraîche. Le JEA se situerait au maximum de convection, à l'extrémité du surplomb de la **CHN** sur la **CHS** (Lambergeon et al, 1981), fig.1-A.5.

Selon Leroux (1986) il serait principalement alimenté par les composantes supérieures de l'alizé boréal et de la mousson.

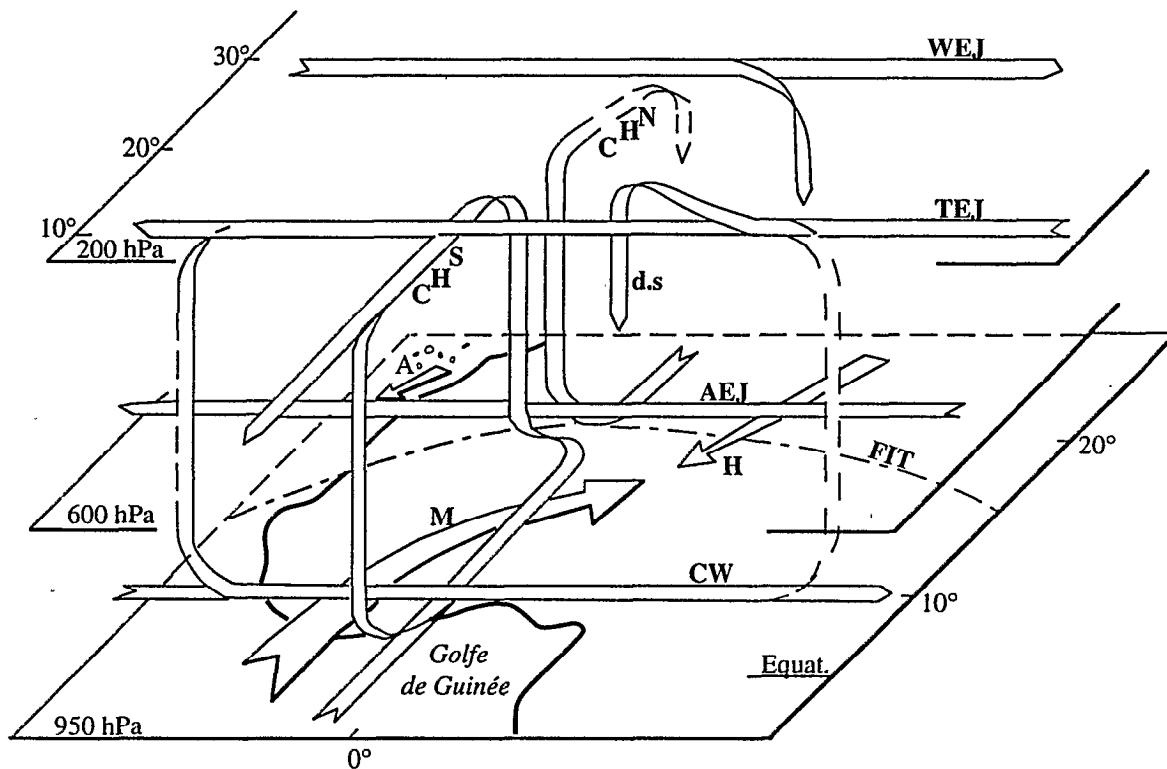
Le **JEA** recycle et transporte donc essentiellement la vapeur d'eau continentale formée au-dessus de l'Afrique entre la côte Est et Dakar (Cadet et Nnoli, 1987) mais probablement aussi une fraction de vapeur issue de l'océan indien (De Félice et al.,1982).

Quoiqu'il en soit sa présence à moyenne altitude gêne l'ascendance des masses d'air de la mousson et entrave ainsi le développement des phénomènes pluviogéniques.

– Ces **JET** d'Est, en raison de leurs variations de vitesses liées à l'incursion de coulées polaires d'altitude engendrent des instabilités de propagation zonales entre 700 et 200 hPa; "vagues dans le courant des Westerlies" de Dorize en 1974 et 1976, ou "Ondes d'Est" (**OE**) de De Félice et al. en 1982. Le mouvement de ces Ondes d'Est dépend aussi des échanges

turbulents entre basse et haute troposphère; de forts mouvements convectifs pouvant ralentir et dévier les courants Jet entre 6000 et 13000 mètres.

Des études ont mis en évidence le rôle particulièrement important de ces courants d'Est sur l'Afrique subtropicale quant-aux conditions de précipitations (Kanamitsu et al., 1978; Wolter, 1989) ou plus modestement de nébulosité (CMS Lannion 1988).



C^H^N	Cellule de hadley nord	C^H^S	Cellule de hadley sud
CW	Cellule de Walker	TEJ	Tropical Est Jet
AEJ	African Est Jet	WEJ	Westerlies
FIT	Front Inter Tropical	H	Harmattan
M	Mousson	d.s	Divergence subsidente

600 hPa Niveau de pression en hecto Pascal

**Fig. 1-A.5 Schéma de circulation au dessus de l'Afrique occidentale
(A partir de Lambergeon 1981, complété)**

En effet ces Jet d'Est qui se situent le plus souvent au contact de masses d'air très différentes par leurs caractéristiques (humidité et température) et leur dynamique (systèmes ascendants au sud et subsidents au nord) ont des effets caractéristiques sur les formations nuageuses (Cirrus, Cirrostratus) qui les accompagnent et qui constituent la plupart du temps d'excellents traceurs de ces courants de haute altitude sur les images satellitaires.

De la dynamique de ces courants Jet dépend celle de la mousson et donc l'importance des pluies d'un hivernage (Dorize, 1974-1976; Fontaine et Pérard, 1986). En occurrence pluvieuse le JEA est apparu relativement faible, à l'inverse du JET dont le dynamisme semble avoir pour effet une aspiration en altitude des masses d'air humides de la mousson, et par conséquent une intensification des précipitations. En occurrence sèche les dynamismes sont inversés; le JEA particulièrement vigoureux a tendance à bloquer à moyenne altitude les masses d'air de la mousson que le JET plus faible n'aspire plus (Citeau et al., 1991; Mahé et al., 1993).

2) Les mécanismes propres aux conditions climatiques sur l'Air:

Le nord du Niger, comme le reste de la zone sub-désertique, se situe, en période estivale, à la limite nord d'affrontement de deux masses d'air qui s'opposent essentiellement par leur humidité:

- la masse d'air boréal, desséchée après son transit saharien, réchauffée à la base, constitue le principal facteur d'instabilité.

- la masse d'air austral, après son long périple océanique, et malgré un réchauffement et un assèchement liés à la traversée d'une partie du continent ouest africain, conserve encore une certaine fraîcheur et humidité potentielles dont le fort différentiel avec la masse d'air saharienne constitue un autre facteur d'instabilité.

En fonction des saisons, le dynamisme de ces masses d'air alterne et crée sur la région des conditions climatiques différentes. La présence même du massif vient augmenter en période estivale la situation d'antagonisme de ces masses d'air. L'Air connaît alors, comme les autres massifs sud sahariens (Dubief, 1959-1960), des conditions de pluviosité nettement plus favorables que celles des bassins encadrant de même latitude.

a) L'hiver, "Tagrest" (Bernus, 1981), de novembre à mars, est une saison sèche et fraîche balayée par le vent du Ténére:

Les températures moyennes sont les plus basses de l'année (Agadez, 22°8; Iférouane, 21°). Les minima sont en janvier (Agadez, 20°; Iférouane, 17°6); les températures nocturnes descendent sous la barre des 10°, voir des 5°. Un vent sec et frais souffle régulièrement à une vitesse moyenne d'environ 4 m.s⁻¹ (15 km.h⁻¹). L'humidité relative est faible (15 à 20 %).

Les hautes pressions subtropicales nord-sahariennes sont prédominantes; elles créent un courant (alizé continental) qui balaie le Sahara du N/NE au S/SW en s'asséchant. Ce vent sec, nommé Harmattan au sud du Sahara, souffle sur l'Air de novembre à mars véhiculant une grande quantité d'aérosols (Dubief, 1952; Mainguet et al., 1976, 1977; Bertrand, 1976; Coudé-Gaussen et Rognon, 1983) qui réduisent singulièrement la visibilité dans le massif durant une bonne partie de la période. C'est le phénomène de "brume sèche".

J.Dubief avait noté dans son "Climat du Sahara" en 1960 que la situation anticyclonique génératrice de ce régime d'harmattan pouvait connaître des poses qui semblaient coïncider avec l'arrivée de "dépressions soudano-sahéliennes". M.Leroux, vingt ans plus tard, parle lui de perturbations du front polaire, qui se présentent sous forme d'anticyclones mobiles entourés d'un creux barométrique, et qui, en s'infiltrant entre deux cellules de hautes pressions subtropicales, provoquent des coulées d'air froid vers le sud.

Ces descentes d'air polaire sont responsables de la chute des températures (elles sont à l'origine des jours de gelées relevés dans l'Air entre Novembre et Janvier par les stations d'Iférouane, Timia, Tabelot) et de l'éclaircissement momentané de l'atmosphère. Elles peuvent aussi être à l'origine de quelques précipitations (Leroux, 1987). Ainsi à Iférouane quelques précipitations, aussi rares que faibles, ont été observées en période froide: 2,4 mm en novembre 57; 1,9 mm en décembre 60; 3,9 mm en janvier 50). Dorize (1974) fait état d'une incursion d'air polaire, le 25 décembre 1960, qui provoqua des pluies jusque sur le sud du Sahara : 7,2 mm à Bardaï sur le flanc nord du Tibesti; 1,5 mm à Zouar sur le flanc sud; 1,9 mm à Iférouane; 0,1 mm seulement à Agadez; latitude à laquelle il semble que la masse d'air se soit trouvée à la limite de sa potentialité pluviogénique.

Ces pluies d'hiver liées à une incursion d'air polaire sont en effet rares, car la traversée du Sahara assèche considérablement les masses d'air qui s'étaient enrichies en humidité sur la Méditerranée. Il semble qu'alors des massifs comme le Hoggar puissent jouer un rôle particulièrement important en forçant l'instabilité par effets orographique et radiatif diurne.

Personnellement je n'ai pas eu la chance de recueillir d'eau entre 1988 et 1990 sur le réseau de pluviomètres du transect nord-sud installé entre Iwelen (19°47 N, 8°25 E) et le site dit "Atérien"(21°40 N, 9° 05 E); mais je me suis trouvé le 27 décembre 1987 vers midi, à une centaine de kilomètres au sud d'Arlit (18°N, à l'ouest du massif), sous une petite averse durant environ 2 minutes. Cette courte précipitation de grosses gouttes éparses n'aurait probablement laissé que des "traces" dans un pluviomètre. Mais des collègues "orstomiens" voyageant le même jour dans la région d'Arakao (19° N, à l'est du massif), ont essuyé une véritable averse dont la durée aurait été d'environ 10 mn. Cette averse de saison froide n'a malheureusement pas été enregistrée par les pluviomètres du transect N/S situé plus au Nord.

Il eut été intéressant de pouvoir disposer d'un peu de cette eau, afin d'essayer d'en déterminer l'origine. Car il est possible que cette pluie ait pu être aussi la conséquence du thalweg barométrique qui est la marque du vigoureux aérojet subtropical d'hiver sur l'Afrique de l'Ouest, entre le sud marocain et la Méditerranée orientale. Certaines pluies d'hiver lui ont été imputées, notamment au Sénégal; ce couloir dépressionnaire pouvant servir de lit aux masses d'air atlantiques humides.

b) L'été, "Akasa", de juillet à septembre, correspond à la saison humide:

Les températures moyennes sont beaucoup plus élevées malgré la présence des pluies (Agadez, 31°; Iférouane, 31°2) et l'humidité relative approche 50 % (Charre, 1974), les périodes sans vent existent, mais les rafales au moment des orages peuvent être très violentes (Testud, 1984).

Le Sahara voit passer le soleil au zénith. L'apport radiatif est maximum au sol et l'échauffement qui en résulte crée des mouvements ascendants (convections) qui génèrent en surface un état dépressionnaire. Cette dépression de surface vient donc renforcer, par effet de succion, l'action dans l'hémisphère sud de l'anticyclone de St Hélène très dynamique à cette période de l'année. L'alizé maritime austral franchit l'équateur s'infléchissant progressivement vers le Nord-Est en traversant le golfe de Guinée (changement de sens de la force de Coriolis) entraînant avec lui les masses d'air tièdes et humides équatoriales. C'est la mousson guinéenne dont l'action vers le Nord va s'essouffler progressivement sur le continent.

Actuellement sur le massif le front intertropical atteint régulièrement 20° N, et même plus comme en témoignent les relevés pluviométriques effectués par nos soins de 1988 à 1990 jusqu'au nord de l'Adrar Bous à 21°10'. Mais Dorize (1974) cite, pour des périodes il est vrai nettement plus humides qu'actuellement, des remontées encore plus septentrionales: jusqu'à Djanet (24°30 N) en Août 1964, et jusque sur l'Anti-Atlas (30°N), position record d'Août 1959.

Ce front apparaît nettement moins septentrional dans les bassins encadrants Ténéré et Azaouak; les années sans pluie n'étant pas rares à Bilma ou Arlit (Lefèvre, 1960).

c) Deux inter-saisons s'intercalent entre les saisons sèches et humides:

– La première, "Awellen", est chaude et sèche d'avril à juin. Les températures moyennes sont les plus élevées de l'année (Agadez, 33°); les maxima journaliers peuvent dépasser 45°. L'humidité relative s'élève, car le FIT atteint le sud du massif.

– La seconde, "Gharat" est un court intermède, de fin septembre à début novembre, les températures moyennes sont encore élevées (Agadez, 30°), et l'humidité relative aussi (≈ 45 %). C'est la période climatique la plus pénible de l'année, jusqu'au retour de l'Harmattan.

Le massif de l'Aïr paraît donc bien être un facteur redynamisant des masses d'air de la mousson, en fin de course à cette latitude. Deux explications complémentaires semblent pouvoir être avancées à ce sujet :

– L'ensemble du massif constitue par rapport aux bassins encadrants une zone d'albedo plus faible (cf la patine noirâtre des regs et roches métamorphiques, des basaltes); l'augmentation de l'effet radiatif au sol stimule les mouvements ascendants et installe une zone dépressionnaire de surface plus creuse, à l'intérieur même (Charre, 1974) du talweg sud-saharien .

– Le massif produit également un effet orographique qui, en obligeant les masses d'air à s'élever, vient renforcer l'effet d'instabilité d'origine radiative (fig. 1-A.6).

Une question importante se pose cependant concernant les pluies d'hivernage de l'Aïr : Relèvent-elles de phénomènes convectifs isolés ou d'organisation de lignes de grains?

Un premier élément de réponse est apporté par Guillot et al. (1988) qui, à partir des images satellitaires Météosat, montrent que la naissance occasionnelle de lignes de grains entre 17° et 20° N au Niger n'intervient apparemment qu'à l'ouest du massif, sur l'Azaouak. Le relief pourrait ainsi jouer un rôle catalyseur sur une partie des masses d'air venues du sud et reprises en altitude par les courants "Jet", sans bénéficier de l'effet pluviogène produit.

Les études statistiques et isotopiques, entreprises sur différents postes de l'Aïr, apporteront ultérieurement d'autres éléments permettant de montrer que les pluies du massif ne relèvent effectivement pas de phénomènes de lignes de grains.

IV. LES SOLS DE L'AÏR

L'exploitation de l'importante banque de données des bassins représentatifs et expérimentaux constituée par l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest (Rodier-Auvray, 1965; Dubreuil, 1970-1972; Lafforgue, 1977; Rodier-Ribstein, 1988...), ou des expériences de simulations de pluies (Collinet-Valentin, 1979; Chevallier, 1982...), ont amené un certain nombre d'auteurs à décrire et à quantifier le rôle des formations superficielles, dans le but de modéliser la relation pluie-débit. L'étude pédologique de l'Aïr reste à faire, mais certains auteurs, à la faveur d'études ponctuelles (Armand, 1986; Giazzi, 1990) ou spécialisées (Morel, 1981; Valentin, 1985), se sont attachés à identifier les principales formations superficielles du massif:

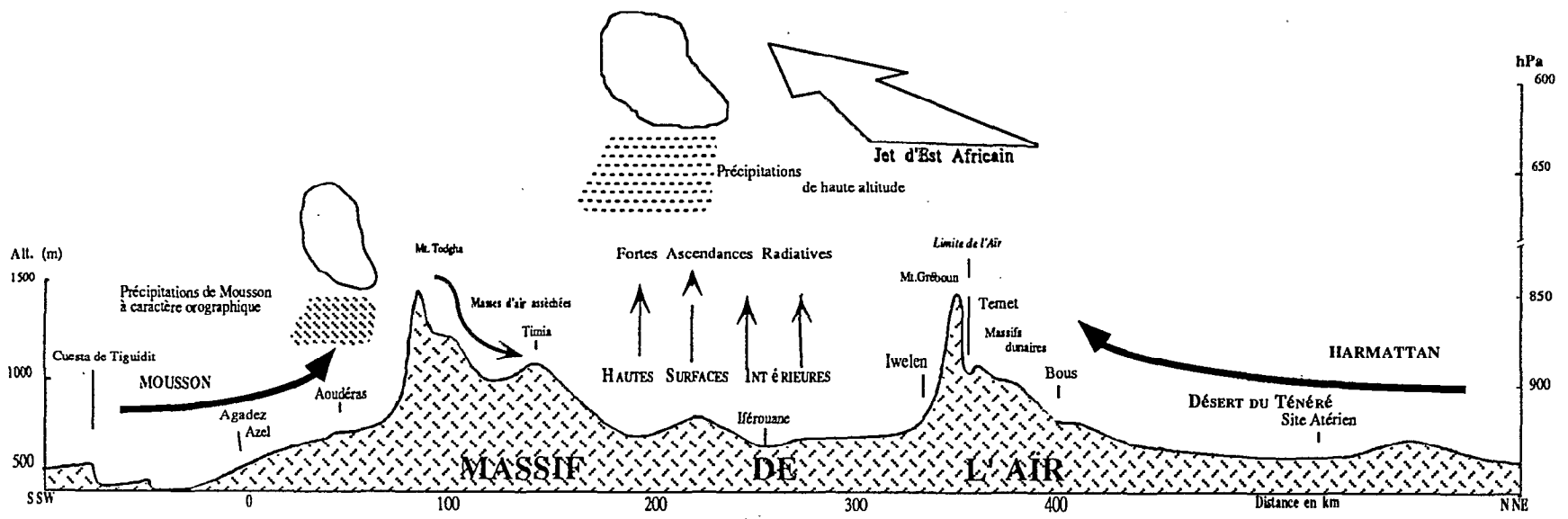
1) Principe de la formation des sols en région de socle sous climat subdésertique:

En absence d'eau une grande partie de l'année, et malgré les fortes températures diurnes, l'altération chimique des roches est un phénomène peu actif. C'est donc l'action mécanique qui prédomine dans ce milieu. Cette action mécanique s'exerce sous l'effet du climat et sous l'effet du mouvement:

a) La thermoclastie est le principal agent d'altération mécanique actuel:

La forte variation nyctémérale des températures liée au rayonnement solaire élevé dans la journée et au refroidissement non moins important la nuit (forte restitution nocturne liée

Fig. 1-A.6 Coupe topographique de l'Air et mouvement des masses d'air.



aux ciels clairs), provoquent de vives et incessantes variations de tensions entre les différents composants de la roche, amenant à la longue sa fragmentation et sa désagrégation.

– La fragmentation prélève en surface de la roche des couches successives, de quelques millimètres à quelques centimètres, en fonction de sa texture.

– La désagrégation parachève, suivant divers processus, le travail de la fragmentation en dissociant les différents minéraux de ce cortex d'altération:

Le processus de micro-fissuration dépend de la texture; une roche à gros grains sera plus sensible à la fragmentation qu'une roche à grains fins. De même la porosité (volumes interstitiels de la roche) est-elle inversement proportionnelle à la résistance de la roche. Enfin les compositions minéralogiques et chimiques entraînent des différences d'altérabilité; le quartz est plus résistant que les feldspaths, eux-mêmes que les micas.

b) L'altération dynamique s'exerce de deux façons:

– La déflation entraîne des éléments plus ou moins fins du sol, en fonction de la vitesse du vent. La projection de ces éléments contre la roche en place produit la désagrégation des éléments transportés aussi bien que celle des éléments impactés. L'action du vent dans l'Aïr est importante toute l'année (Mainguet et al., 1976-1977).

– Les mouvements tectoniques sont nombreux dans le massif, comme en atteste la densité des failles. Ils constituent des zones de broyages où la roche fragilisée est plus soumise à l'action d'altération des agents atmosphériques (Raulais, 1957; Moreau, 1982; Morel, 1984)

2) Les types de sols:

Les affleurements du socle représentent 90 % des surfaces dans l'Aïr. La structure métamorphique recoupée de granites et de formations volcaniques est partiellement ruiniforme. Elle ne correspond pas, en tout état de cause, au pouvoir d'érosion du climat actuel. Les accumulations de versant et de bas de pente témoignent de climats plus hydrolysants et au pouvoir de transport plus élevé. Compte tenu du relief et des pentes, les éléments prélevés sur le socle ont été triés par les déplacements successifs. Cette sélection explique, en grande partie, la différenciation des sols sur les bassins:

a) Les sols des reliefs:

Ils sont, sauf exception locale (hautes surfaces subhorizontales, contre pentes, jeux de failles) très peu développés; constitués seulement de blocs et de matériaux plus ou moins grossiers disséminés en surface des affleurements de la roche mère. Ils comportent peu de matériaux fins, ces derniers étant rapidement entraînés par les ruissellements occasionnels.

b) Les sols des bas de versants:

Ils restent des sols minéraux bruts sous deux formes (Giazzi 1990):

– Les lithosols se développent lorsqu'un affleurement de roche mère (granite surtout) domine un talweg. Ils sont constitués d'une accumulation, en bas des versants, de débris grossiers (blocs et pierres) et plus fins (graviers et sables). Ils ne présentent généralement pas d'organisation pelliculaire de surface. L'épaisseur de ces colluvionnements est la plupart du temps limitée, et leur porosité font qu'ils n'occasionnent qu'un faible retard au ruissellement des versants.

– Les régosols comprennent, à la fois, les sols minéraux bruts d'ablation et d'accumulation. Situés à proximité des fonds de vallées, ils présentent généralement des organisations pelliculaires de surface (OPS):

. Les sols d'ablation éolienne (regs) sont constitués de galets allochtones de natures diverses, en fonction des milieux, pavant en surface une matrice sablo-limono-argileuse de faible épaisseur (5 à 10 cm) installée dans l'Air sur un paléosol sablo-argileux. Cette matrice possède une porosité vésiculaire et ses argiles ont toujours la même composition: Montmorillonite, kaolinite, illite. Sur ces sols d'ablation, Valentin (1985) montre que l'infiltration n'est significative (temps d'imbibition) que durant un temps très court (quelques minutes) après le début d'une averse d'intensité utile (susceptible de produire un ruissellement).

. Les sols d'accumulation ont pour origine le ruissellement des versants et les épendages de hautes eaux des koris. Ils correspondent dans les petits talwegs à la terrasse du lit majeur. Ils sont constitués de matériaux variés, des graviers aux limons, sur lesquels le pouvoir de transport des écoulements impose un tri (Collinet et al,1979):

Les matériaux les plus fins se déposent dans les zones périphériques d'inondation, là où les vitesses sont les plus faibles; les dépôts les plus grossiers s'opérant à proximité du centre des écoulements.

c) Les sols de fonds de vallées:

Ils restent peu évolués. Leurs éléments appartiennent au domaine sableux, mais ils se superposent en horizons qui, dans les premiers décimètres, présentent d'importantes variations granulométriques. La matière organique fait son apparition dans ces sols.

Tab. 1-B.1 Porosité du lit majeur du Téloua à Azel

Profondeur	Porosité efficace	Description granulométrique
0 à 5 cm	14 %	Sable fin limoneux
10 cm	36 %	Sables grossiers (1 à 3 mm de diamètre)
20 cm	34 %	Sable fin (<< 1 mm)
50 cm	30 %	Sables mélangés (grossiers > fins)
70 cm	26 %	Sables mélangés (fins = grossiers)
80 cm	18 %	Sables mélangés (fins > grossiers)

Un test de porosité effectué en 1990 (Tab.1-B.1) sur une coupe du lit majeur du Téloua à

Azel, met aussi en évidence la composition granulométrique de ces alluvions sableuses de fond de vallée. Giazzi (1990) effectuée en 1987, sur les lits majeur et mineur du Téloua, une étude granulométrique dont les tableaux 1-B.2 & 3 relèvent les valeurs caractéristiques:

Tab. 1-B.2 Granulométrie du lit majeur du Téloua

Lit majeur		Granulométrie		
Horizon	Constitution	d10 (mm)	dm (mm)	d90 (mm)
0 à 60 cm	Sablo-limoneux	0,009	0,07	0,23
100 à 115 cm	Sables limoneux	0,140	0,77	4,00
115 à 128 cm	Limons sablo-argileux	0,001	0,07	1,30

Tab. 1-B.3 Granulométrie du lit mineur du kori Téloua

Lit majeur		Granulométrie		
Horizon	Constitution	d10 (mm)	dm (mm)	d90 (mm)
2 à 24 cm	Sables limoneux + graviers	0,22	0,74	3,20
24 à 30 cm	Sablo graveleux	0,29	2,10	7,30
53 à 64 cm	Sablo limoneux	0,18	0,70	1,80

Sur le kori Tamazalak, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich a également pratiqué une étude granulométrique dont les valeurs sont présentées par le tableau 1-B.4

Tab. 1-B.4 Granulométrie du lit mineur du kori Tamazalak

LIT MINEUR		GRANULOMETRIE		
Profondeur	Constitution	d10 (mm)	dm (mm)	d90 (mm)
50 cm	Limono sableux	0,004	0,07	0,45
150 cm	Sables limoneux	0,03	0,35	1,00
250 cm	sables + limons + graviers	0,09	0,70	2,05
350 cm	sablo graveleux + limons	0,18	0,80	2,80

La texture sableuse apparaît comme le dénominateur commun de toutes ces formations de fond de vallée. La capacité de transport des écoulements constitue un facteur de différenciation dans la distribution des matériaux. Les éléments les plus fins, limons et argiles, qui ne représentent jamais plus de 20 % de la masse du sédiment, se répartissent essentiellement en marge des écoulements. Les éléments les plus grossiers, de texture graveleuse, se concentrent dans les lits mineurs, et témoignent de la vigueur des écoulements longitudinaux au creux des talwegs.

CONCLUSION:

Les sols du massif sont dans l'ensemble peu développés et peu évolués. Ils restent bruts dans le contexte climatique actuel.

Sur les interfluves, les larges affleurements du socle, laissent peu de place aux sols qui n'apparaissent, ponctuellement, dans les creux, qu'à la faveur d'accidents tectoniques (zones de broyage, contres pentes...). La vigueur du relief et des évènements hydropluviométriques ont assuré l'entraînement des éléments fins vers le creux des talwegs (Tricart, 1963; Rognon, 1980; Dubar, 1988; Durand et al. 1983; Gasse et al., 1990). Les conditions actuelles apparaissent nettement plus limitatives (Servant, 1974; Maley, 1981; Morel, 1981-1986; Beltrando et al., 1986; Bernard, 1986; Leroux, 1986; Tehet, 1990).

Les formations de bas de pente se présentent souvent sous forme de glacis, d'érosion, puis d'accumulation: le reg mêlant des éléments très grossiers (caillouteux), à des éléments plus fins (graviers, sables, limons), faisant place progressivement, à l'approche du talweg, à des associations de moins en moins hétérogènes: des graviers sablo limoneux aux sables argileux. Toutes ces formations ont en commun une OPS liée à la faible cohésion des éléments du sol, à l'intensité des précipitations, au ruissellement en nappe, qui est le résultat d'une migration des éléments les plus fins (hygrophiles) vers la surface (Collinet-valentin, 1979). Cette OPS a pour effet une imperméabilisation, très rapide après le début de la pluie, des surfaces de bas de pente, qui se transforment en milieu mou et spongieux, où le pied, la roue du véhicule, s'enfoncent de plusieurs centimètres après la pluie.

La texture sableuse est le dénominateur commun de toutes les formations alluviales. Les fonds de vallées sont les seuls secteurs, dans ce milieu subdésertique, qui présentent une potentialité significative d'infiltration des eaux météoriques.

V. LA VEGETATION DANS L'AÏR:

Les sévères conditions physiques du milieu dégagées précédemment, mettent en évidence le peu d'aptitude de l'Aïr à entretenir la vie.

1) L'Aïr ne constitue pas un milieu homogène pour la végétation;

Aucun des facteurs conditionnant habituellement l'existence de la végétation ne présente une quelconque homogénéité sur l'ensemble du massif:

– Suivant l'axe de pénétration (S/SO - N/NE) de la mousson guinéenne, les pluies diminuent d'Ouest en Est et du Sud au Nord.

– L'épaisseur et le niveau d'évolution des sols dépendent, dans ce milieu d'altitude, de la distance qui les sépare du lieu de prélèvement, généralement la partie supérieure des bassins versants, là où les pentes sont les plus fortes. Le drainage du massif s'effectue d'Est en Ouest et les conditions édaphiques évoluent donc positivement dans ce sens.

D'une manière générale, la végétation rupicole sera très discontinue sur les regs et plateaux rocailloux où elle se réfugie entre les pierres à la recherche des faibles quantités de sols issus de la désagrégation de la roche mère et des apports hydro-éoliens.

C'est dans les fonds de vallées, sur les basses terrasses, là où convergent les ruissellements et où les accumulations sont les plus importantes, assurant une partie de l'année au moins, aux systèmes racinaires, des conditions hydriques acceptables, que la végétation est la plus dense et la plus diversifiée.

La dissymétrie du massif donne à la partie orientale des altitudes plus élevées susceptibles d'améliorer les conditions de vie; les températures étant moins fortes, l'humidité relative plus importante, et quoique l'effet d'altitude sur les précipitations soit limité par l'effet de continentalité (les masses d'air humides venant du sud-ouest, ont dû traverser tout le massif).

2) L'Aïr est une région de transition pour la végétation:

entre les types "Sahélien" du sud et "Saharo-Sindien" du nord.

Au sud, l'effet de massif assure une meilleure pluviosité qui explique la présence à cette latitude d'une enclave sahélienne de végétation. Au nord et à l'est, la raréfaction des pluies et l'altitude se traduisent par la juxtaposition de types végétaux à la fois sahélo-soudaniens, méditerranéens, saharo-méditerranéens et centro-sahariens.

Maley (1981) met en évidence, au cours d'un recensement pollinique sur le massif, la faible proportion (2,5 %) d'éléments méditerranéens. Il en conclut qu'il n'existe pas dans l'Aïr d'étage montagnard méditerranéen. Il est néanmoins intéressant de noter que cela n'a sans doute pas toujours été le cas (Maley, 1982; Lezine, 1989), puisque sur le mont Gréboun, dans le nord du massif, un peu en dessous du sommet de 1944 mètres, on trouve encore quelques oliviers (*Olea laperrinei*) en position refuge. Ces oliviers n'ont pas été datés, mais la taille de leurs

troncs (2 mètres de diamètre) atteste de leur grand âge, sans doute plusieurs fois millénaire d'après Quezel et al (1962) et Frizon Roche (mission Berliet Ténéré-Tchad de 1960).

De même, un collègue archéologue ORSTOM recueille en 1982, lors d'une prospection archéologique sur les monts Bagzanes, à 1850 mètres d'altitude, deux plantes (*Boscia salicifolia* et *Grewia flavescens*) dont l'optimum écologique se situe actuellement en Afrique de l'ouest entre les isohyètes 500 et 600 mm (Roset, 1987). La pluie annuelle sur les Bagzanes ne dépassant pas 100 mm, on peut considérer que ces plantes ne survivent actuellement que grâce à l'altitude qui limite les fortes températures et génère, une partie de l'année, quelques faibles rosées de point du jour.

D'une manière générale les différentes espèces rencontrées sur le massif présentent toutes à des degrés divers, une adaptation à la sécheresse:

.Cycles végétatifs très courts (cas des plantes herbacées),

.Adaptation physiologique des plantes plus vivaces: limitation du système aérien par rapport au système racinaire, diminution de la taille des feuilles dont l'épiderme se cuticulise raréfaction des stomates, ou enroulement du limbe en épine.

Les botanistes, dont Quezel (1965) distinguent six groupes d'espèces dans l'Aïr:

– Le groupe tropical représente à lui seul 56 % de la population spontanée. Toutes les strates sont représentées; des graminées annuelles comme *Cenchrus biflorus* (cram cram) ou *Aristida Turgidum*, l'alémos, principale plante à fourrage de la dépression périphérique sud de l'Aïr, aux arbres et arbustes (*Boscia salicifolia*, *Anogeissus leiocarpus* - bouleau d'Afrique *Balanites aegyptiaca* - savonnier, *Acacia nilotica*, *Acacia seyal* - mimosa épineux, *Acacia albida* - gao).

– Le groupe saharien ne représente que 13 % de la flore; on y trouve les Tamaris (*Tamaris gallica*, *aphylla*), les Acacias comme *erhenbergiana*, des espèces buissonnantes comme *Cornula monacantha* ou *Calotropis procera*, et des espèces herbacées du genre *Aristida stipoides* ou *Panicum turgidum*..

– Le groupe méditerranéen ne présente qu'une faible densité de population (2,5 %) et des biotopes très sélectifs d'altitude (*Rhus tripartita* ou *Olea lapperinei* - Olivier sauvage) ou de proximité de point d'eau (*Pulicaria arabica* ou *Plantago afra*) qui soulignent l'état de survivance de ce groupe dans les conditions actuelles.

– Le dernier groupe est un amalgame d'espèces non spécifiques (16 %) cosmopolites ou endémiques (10 %), que l'on retrouve indifféremment du Sahara au tropique comme *Acacia raddiana*, *Heliotropium undulatum* ou *Zizyphus* (Jujubier) qui peuvent être considérées comme des éléments de liaison des deux groupes précédents.

3) La répartition des espèces dans le massif:

Compte tenu de l'hostilité générale du milieu les formations végétales apparaissent toujours très ouvertes. Mais la densité et la répartition des espèces présentent de grandes variations liées essentiellement aux conditions édaphiques et hydriques.

a) C'est naturellement en bordure des koris que l'on rencontre les densités de végétation les plus fortes:

Là où les accumulations sont les plus importantes et la présence d'eau la plus fréquente et la plus permanente. Le phénomène est d'autant plus net que l'on progresse vers l'aval des bassins. La végétation évite soigneusement, à part *Calotropis procera* (pomme de sode - roustonnier), le lit mineur où les écoulements sont souvent torrentiels, et colonise le lit majeur et le bas des versants, lorsqu'ils présentent des glacis d'accumulation ou des ravines suffisamment alluvionnées.

Les principaux talwegs apparaissent donc soulignés par une bande de verdure dans laquelle les naturalistes comme Newby (1982) distinguent trois secteurs:

– En berge des koris se développe un groupement ripicole hygrophile, essentiellement arborescent de *Ziziphus spinacristi* et d'*Acacia albida* sous lesquels on trouve parfois quelques espèces graminées pérennes du type *Panicum turgidum*, *Bubonium graveoleus* ou *Cynodon dactylon*.

– Le lit majeur sablo-limoneux est localement le lieu d'un véritable couvert arborescent qui va jusqu'à recevoir l'appellation "forêt" (comme la forêt de Dabaga, sur le bassin intermédiaire du Téloua). Il s'agit en fait d'une formation assez ouverte où dominent le palmier doum (*Hyphaena thebaica*) et le savonnier (*Balanites aegyptiaca*). Mais où on trouve aussi des Acacias comme *radiana*, et une strate de graminées pérennes type *Panicum turgidum*, ou annuelle type *Schouwia thebaica*.

– Entre les affleurements rocheux des pentes et le lit majeur, en fonction de l'importance des accumulations, se développe une savane xérophile faiblement arborée d'Acacia type *erhenbergiana* ou *seyal* (mimosa épineux). La strate herbacée annuelle de type *Aristida mutabilis* est aussi clairsemée.

b) Sur les versants:

La végétation n'existe que dans le creux des talwegs qui marquent le flanc des massifs où affleure généreusement le socle métamorphique ou les formations volcaniques.

Newby (1990) distingue deux types de populations de ravine en fonction du développement de cette dernière:

– Les têtes de ravines sont généralement encombrées de blocs plus ou moins grossiers entre lesquels quelques dépôts plus fins restent momentanément bloqués. A ce niveau la végétation saxicole est constituée:

- . de plantes buissonnantes de type *Solenostemma oleifolium*,
- . de plantes herbacées pérennes de types *Aerva javanica* ou *Cymbopogon schænanthus*,
- . de plantes herbacées annuelles, là où les dépôts sont plus importants: *Aristida mutabilis*.

– Les bas de ravines concentrent une plus grande quantité de matériaux moins grossiers gravelo-sableux. La végétation psammophile regroupe:

- . des espèces herbacées pérennes type *Panicum turgidum*,
- . des espèces herbacées annuelles type *Maerua crassifolia*,
- . des espèces arbustives type *Maerua crassifolia*.
- . des espèces arborescentes type *Acacia (tortilis ou raddiana)*.

c) Sur les hauteurs:

Lorsque les affleurements rocheux incorporent suffisamment de sols, une population saxicole et relativement hygrophile, plus dense et variée que sur les versants, se développe entre les blocs.

Les quelques bas fonds et lits de koris des surfaces sommitales sont occupés d'une population de graminées xérophiles où les formes sahariennes restent dominées par les formes tropicales. Mais ces dernières sont, comme nous l'avons vu précédemment pour *Bocia salicifolia* et *Grewia flavescens* dans les Bagzanes, au dessus de 1500 mètres, à l'état de survie.

En dehors des formations steppiques, les hautes surfaces comptent quelques Acacias dont la densité diminue avec la latitude, l'effet climatique d'altitude compensant de moins en moins l'effet de continentalité.

d) A proximité des points d'eau:

Dans les massifs et sur leurs versants, à la faveur de contre-pentes occasionnées par des montées filoniennes ou autres manifestations volcaniques, apparaissent des points d'eau pérennes lorsqu'ils sont alimentés par des sources.

Ces mares qui portent localement le nom d'"aguelmam" (mot d'origine berbère) ou de "guelta" (mot d'origine arabe) sont généralement le lieu d'une vie végétale dense et variée.

.Autour des points d'eau on rencontre des formations arbustives et arborescentes de tamariniers (*Ficus gnaphalocarpa*), de figuiers sauvages (*Ficus salicifolia*), et même des palmiers dattiers (*Phoenix datlifera*).

.Sur les berges se trouvent des formations herbacées de type Rubiacée (*Borreria chaetocephala*) ou Cyperacée (*Cyperus rotundus, eleusinoides, laevitagus*); des graminées (mil sauvage)

.Dans l'eau même, on rencontre des formations aquatiques types Potamogetonacées ou lemnaées (lentilles d'eau).

CONCLUSION:

La végétation de l'Aïr, malgré sa relative diversité, reste une végétation steppique très ouverte où les houppiers de la strate arborescente dépassent rarement 7 mètres. Par contre, lorsque les remplissages alluvionnaires le permettent (à l'aval des bassins), le développement racinaire peut atteindre deux à cinq fois celui de la partie aérienne.

La végétation de l'Aïr ne constitue donc jamais un frein aux phénomènes d'érosions mécaniques, qu'ils soient liés au ruissellement ou à la déflation.

Plus on gagne en latitude et plus les phénomènes d'aridité contractent la végétation dans les talwegs, plus les espèces sahariennes prennent de l'importance; même si globalement l'altitude du massif permet toujours aux espèces tropicales de dominer les espèces xérophiiles.

L'accentuation de la sécheresse des vingt cinq dernières années a placé un certain nombre de ces espèces tropicales, indépendamment de leur situation sur le massif, dans un véritable état de survivance. Les cycles végétatifs incomplets, la disparition de certaines espèces annuelles (*Aristida funicula*) en attestent.

Localement, l'action anthropique vient modifier la répartition naturelle de la végétation:

.Dans le sens d'une densification; sur la terrasse du lit majeur des principaux koris, à l'abri de digues, en amont de verrous naturels qui soutiennent le niveau piézométrique de la nappe alluviale, se développent de véritables oasis de verdure à plusieurs niveaux de cultures: Le palmier dattier domine les arbres fruitiers (grenadiers, figuiers, citronniers...), eux mêmes entourant des cultures maraîchères, voir céréalières.

. dans le sens d'une désertification; sur le passage des troupeaux ovins et caprins, la raréfaction de la strate herbacée amenant l'homme à émonder abusivement les arbres.

CHAPITRE 2

"LES COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT"

A. LES COMPOSANTES CLIMATIQUES LOCALES:

I. LES DONNEES DE BASE:

La connaissance des conditions climatiques locales est essentiellement liée aux données des stations météorologiques d'Agadez et Iférouane. Des aménagements locaux à In Doudou, Aoudéras, El Méki, Timia, Tin Tellous, Tamazalak, proposent, pour quelques années seulement, dans la plupart des cas, des données trop fragmentaires et incomplètes, pour servir de base à une étude climatique.

Les observations des stations météorologiques exploitées par l'ORSTOM, dans la cuvette d'Agadez et à Azel, retiennent cependant l'attention, dans la mesure où elles apportent, comme Alarces, des renseignements particuliers (profils d'humidité des sols), ou comme Azel des mesures sur un environnement (de reg) non présent à Agadez.

1) L'insolation:

C'est la composante principale du climat. Le rayonnement solaire global exerce un effet cumulatif diurne sur les couches atmosphériques. De la durée d'insolation journalière dépend donc la température, et par voie de conséquence, l'humidité relative et l'évaporation.

A la latitude de l'Aïr, en position sud-saharienne, les couvertures nuageuses sont peu fréquentes, et leur potentialité, qui s'exerce essentiellement en saison des pluies, est limitée à un petit nombre d'heures dans la journée. L'une des conséquences principales de ce rayonnement élevé est la permanence des fortes températures diurnes. Les ciels clairs étoilés des nuits, qui permettent au rayonnement terre-atmosphère d'exercer un rafraîchissement compensatoire, expliquent la forte amplitude diurne des températures journalières.

Tableau 2-A.1 Insolation à Agadez (h,1/10)

Insolation	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Insolation max possible à 17° N	11,3	11,7	12,0	12,6	12,9	13,1	13,0	12,8	12,3	11,8	11,4	11,1
Insol moy 61-70	9,5	9,9	9,5	8,9	9,9	9,3	9,8	9,1	9,4	9,8	10	9,4
% optimum	84	85	79	71	77	71	75	71	76	83	88	85
Insol moy 75-88	9,6	10	9,3	9,6	9,0	8,1	8,7	9,2	9,5	9,9	10	9,6
% optimum	85	85	77	77	67	62	66	72	77	84	87	87

La comparaison à Agadez de la durée d'insolation, par rapport à l'optimum à 17° N, des périodes de sécheresse et pré-sécheresse (tab.2-A.1, fig.2-A.1) permet quelques observations:

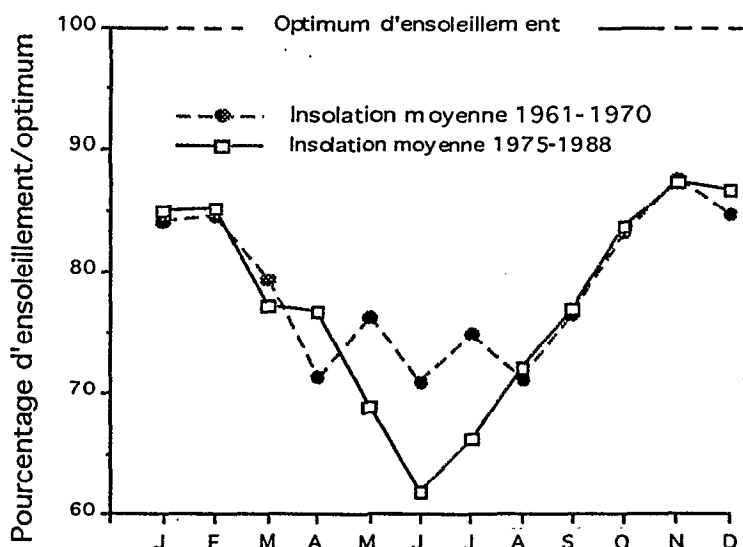


Fig. 2-A.1 Evolution de la durée d'insolation à AGADEZ, avant et après le début de la sécheresse.

La durée d'insolation est comparable huit mois sur douze; maximale en saison froide, d'octobre à février, avec des valeurs représentant 85 à 90 % de l'optimum latitudinal, elle diminue ensuite rapidement jusqu'aux minima (60 à 70 %) de fin de saison chaude et de saison des pluies, où s'exerce seulement une différence notable entre les deux périodes.

Un premier minimum en avril, bien marqué durant la période avant sécheresse, et qui correspond à une période de brumes sèches active (R. Lefèvre, 1960; Bertrand, 1976), n'apparaît qu'un simple palier au cours des années de sécheresse. La raréfaction des brumes sèches expliquerait donc le meilleur ensoleillement actuel d'Agadez en avril.(tab. 2-A.2)

Tab. 2-A.2 Trouble atmosphérique à Agadez, période 1953-1960

Nbre de j. moy	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Brume sèche	2	3	2,3	5,9	4,1	2,9	0,4	0,1	1,9	1,4	1,5	2,1
Chasse sable	1,1	1,5	0,5	1,4	2,9	4,9	7,9	5,6	2,4	0,5	0,4	1,3

De mai à juillet l'insolation est minimale pour les deux séquences:

– Au cours de la période de pré-sécheresse, la diminution des brumes sèches marque en mai un retour à des conditions plus favorables à l'insolation. Alors qu'au cours de la période récente, la montée précoce des masses nuageuses de la mousson accentue la limitation du rayonnement au sol.

– En juin, la densification de la masse nuageuse qui accompagne le premier passage du FIT est plus sensible au cours de la période récente qu'au cours de la précédente. C'est à ce moment que la différence de rayonnement est la plus sensible (en moyenne 8 à 9 %).

– En juillet, l'augmentation du nombre des épisodes pluvieux, qui épuisent partiellement le réservoir, et le déplacement du FIT vers le nord permettent un meilleur ensoleillement au cours des deux périodes; l'écart de rayonnement se maintient.

– Ce n'est qu'en août, au maximum de la saison des pluies, que s'opère à nouveau la parité des deux périodes pour le rayonnement.

2) Les températures:

a) Répartitions spatiale et temporelle des valeurs mensuelles:

Les données sont traitées et présentées sous forme de moyennes à l'échelle mensuelle pour la période de pré-sécheresse aux deux stations d'Agadez et Iférouane (Tab. 2-A.3 & 4)

Tab. 2-A.3 Températures à Agadez, période 1951-1970

T (°C)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec	An
T max	29,2	32,1	36	39,6	41,2	41,6	39,1	37	38,6	37,8	33,5	29,7	36,3
T min	11,3	13,3	17,4	22	24,5	25	23,9	23	23	20,6	15,1	12,6	19,3
T moy	20,5	22,8	27	30,7	33,1	33,4	31,5	29,8	30,8	29,4	24,4	21,1	27,9
Ampli	17,9	18,8	18,6	17,6	16,7	16,6	15,2	14	15,6	17,2	18,4	17,1	17

Tab. 2-A.4 Températures à Iférouane, période 1955-1970

T (°C)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec	An
T max	28,5	31,7	34,7	38,1	39,9	41,1	39,5	38,2	38,7	36,4	32,9	29,6	35,8
T min	6,8	9,8	14,1	20,8	23,5	25,5	24,1	23,7	22,9	20,1	13,1	8,8	17,7
T moy	17,6	20,7	24,4	29,4	31,7	33,3	31,8	30,9	30,8	28,2	23,0	19,2	26,8
Ampli	21,7	21,9	20,6	17,3	16,4	15,6	15,4	14,5	15,8	16,3	19,8	20,8	18,0

T max: Moyenne interannuelle des moyennes mensuelles des maxima journaliers.

T min: Moyenne interannuelle des moyennes mensuelles des minima journaliers.

T moy: Moyenne interannuelle des moyennes mensuelles des 8 relevés journaliers.

L'annexe (2-A.I,1), qui illustre les deux tableaux précédents montre que les températures moyennes mensuelles, qui évoluent de la même manière du sud au nord du massif, restent élevées toute l'année, malgré l'effet d'altitude, et compte tenu de l'environnement désertique (Sahara au nord et Ténéré à l'est).

– Les températures moyennes maximales sont toujours supérieures, d'un degré environ à Agadez, en fonction d'une altitude et d'une latitude moins élevées (500 pour 650 m; 17° pour 19° N), sauf au cœur de l'hivernage (août), où le minimum secondaire lié aux précipitations apparaît moins marqué à Iférouane.

– La différence des températures moyennes minimales est beaucoup plus nette, 3 à 4 °C durant la saison sèche de novembre à mars. En saison des pluies cet écart disparaît, sous l'effet du rafraîchissement plus limité déjà évoqué pour Iférouane.

– Ces écarts importants sur les minima se traduisent à Iférouane par des amplitudes supérieures de 3 à 4°C en saison fraîche. Intrinsèquement ces amplitudes moyennes qui dépassent 20° en saison froide sont considérables et apparaissent tout à fait représentatives du milieu aride où les contrastes thermiques sont d'autant plus vigoureux que l'on pénètre la zone désertique.

b) Evolution des températures avec la sécheresse:

Les valeurs moyennes enregistrées au cours de la période 51-70 ont été comparées à celles de la décennie 77-88 à Agadez: (tableau 2-A.5)

Tab.2-A.5 Températures à Agadez, période 1977-1988

T (°C)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec	An
T max	28,1	28,8	35,6	39,6	42,1	41,5	39,0	39,0	39,5	37,8	32,9	28,9	36,1
T min	11,7	13,4	18,5	23,3	26,6	26,7	25,3	24,7	24,9	22,6	16,4	12,3	20,5
T moy	19,9	22,4	27,1	31,5	34,4	34,2	32,0	31,5	32,1	29,5	24,7	20,2	28,3
Ampli	16,4	15,4	17,1	16,3	15,5	14,8	13,7	14,3	14,6	15,2	16,5	16,6	15,5

Les températures moyennes maximales de la dernière décennie apparaissent plus basses en saison froide (novembre à février), plus élevées en fin de saison chaude (mai) et en cours d'hivernage (août-septembre). Les températures moyennes minimales sont plus élevées toute l'année et plus particulièrement en fin de saison sèche (avril-mai); conséquence, les amplitudes diminuent en moyenne de 1,5 °C.

La tendance est donc à un réchauffement du climat local qui s'effectue plus par une élévation des valeurs minimales en saison chaude et humide, que par l'augmentation limitée des maxima d'hivernage, en liaison avec l'affaiblissement des quantités précipitées de la période de sécheresse.

c) les températures extrêmes:

Les contrastes sont encore plus importants comme en témoignent les valeurs relevées durant la décennie 1961-1970 à Agadez (Tab. 2-A.6)

L'écart enregistré en février (près de 37°) et l'amplitude annuelle absolue de la décennie (qui dépasse 43°) sont révélateurs de l'appartenance au milieu désertique.

Tab. 2-A.6 Températures à Agadez, période 1961-1970

T (°C)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec	An
T max	35	38,5	42	43,2	45	45	44,2	42	42,8	40,9	38,9	36,1	41,1
T min	5,1	1,9	8,2	9	17,5	18,1	16	17,6	17,6	13,5	7,0	5,0	11,4
Ampli	29,9	36,6	33,8	34,2	27,5	26,9	28,2	24,4	25,2	27,4	31,9	31,1	29,7

Lefèvre (1959) relève à Iférouane, durant la période 55-58, des températures absolues équivalentes.

Les températures journalières diminuent avec l'altitude et vers l'est du massif. Morel (1984) le constate au cours d'une mission qu'il effectue dans l'Aïr à l'automne 1971:

La décroissance avec l'altitude est conforme au schéma habituel: 0,7 à 0,8 degré par 100 mètres en saison chaude; 0,4 à 0,5 degré par 100 mètres en saison froide.

Compte tenu des températures inférieures à 5°C enregistrées à Iférouane (650 m) et Agadez (500 m) en janvier-février, il est normal que sur les massifs les gelées existent au cours de la même période. Ainsi Morel signale 9 jours de gelée sur le mont Bagzane en février 1984 entre 1400 et 1500 mètres d'altitude; des légumes qui gèlent dans les jardins des oasis de Timia (1100 m) et de Tabelot à seulement 840 m, mais à l'est du massif.

Les températures maximales sont élevées toute l'année, car la durée de l'insolation est toujours proche du maximum possible. Elles semblent d'autre part peu sensibles à la situation géographique; ce sont les minima qui varient le plus en fonction de la latitude et surtout de l'altitude et de la longitude.

3) Les vents:

a) Le régime:

Il résulte du jeu des champs de pressions sud tropicaux (Lambergeon et al 1981).

Charre (1974) montre qu'il existe deux grandes périodes pour les vents à Agadez:

– De novembre à mars, le régime d'Harmattan, vent sec du Ténéré de secteurs N-Est à Est prédomine. Ce vent souffle avec régularité près d'un jour sur deux à une vitesse n'excédant généralement pas 25 km/h (7 m/s). C'est à lui que l'on doit le maintien en suspension des particules fines de la "brume sèche" fréquente à Agadez entre janvier et mars (Dubief, 1952; Mainguet et al, 1976-1977; Coudé-Gaussen & Rognon, 1983).

– La saison chaude d'avril à juin, qui correspond à l'arrivée progressive des masses d'air de la mousson guinéenne, est généralement marquée par des calmes, résultant du marais barométrique d'intersaison. Au milieu des après-midi les plus chauds, des ascendances thermiques tourbillonnantes entraînent à des centaines, voir des milliers de mètres d'altitude, la poussière du sol. Visibles de très loin, ces colonnes sont des génies dans la légende Touarègue.

– La saison des pluies de juillet à septembre voit le retour de régimes variés de secteurs SW à NW dont les vitesses peuvent être momentanément élevées sous les grains (>100 km/h). Ces brefs, mais vifs, coups de vent qui précèdent la pluie d'orage mettent en suspension de grandes quantités de poussières et de sable capables d'obscurcir totalement, durant quelques minutes, la lumière du jour; c'est la tempête de sable.

b) Les vitesses:

– La représentation des vitesses moyennes annuelles cumulées montre un très net renforcement du régime des vents à Agadez à partir de 1966 (Fig. 2-A.2)

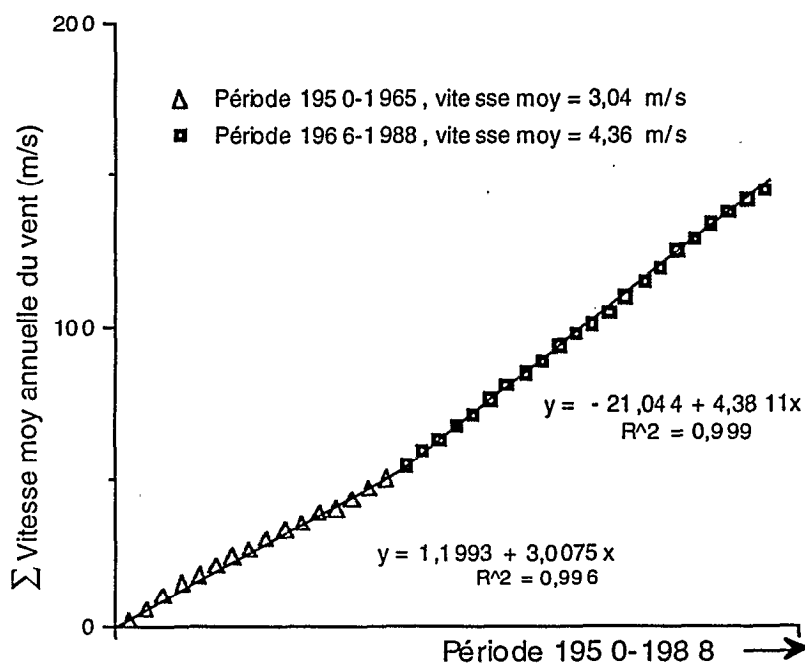


Fig. 2-A.2 Evolution de la vitesse moyenne du vent à Agadez entre 1950 et 1988

Cette vitesse moyenne passe avec la sécheresse de 3,04 m/s à 4,36 m/s.

– La répartition mensuelle des vitesses moyennes (Tab.2-A.7) montre que toutes les saisons sont concernées par ce renforcement du régime. Il semble cependant à l'observation de la figure 2-A.3, que le régime d'Harmattan de saison froide le soit plus particulièrement, et que le calme principal de fin de saison des pluies, au moment du retrait vers le sud du Front Inter Tropical soit escamoté par une reprise très rapide, dès octobre, du régime d'Harmattan.

Tab.2-A.7 Vitesse moyenne mensuelle du vent à Agadez

Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Période 50-65	3,6	3,6	3,2	3,0	3,0	2,7	3,1	2,8	2,3	2,7	3,3	3,4	3,04
Période 66-88	5,3	5,1	5,0	4,4	4,0	3,7	3,8	3,5	3,5	4,3	4,9	5,0	4,36
Moyenne	4,6	4,5	4,3	3,8	3,6	3,3	3,5	3,2	3,0	3,6	4,2	4,3	3,83

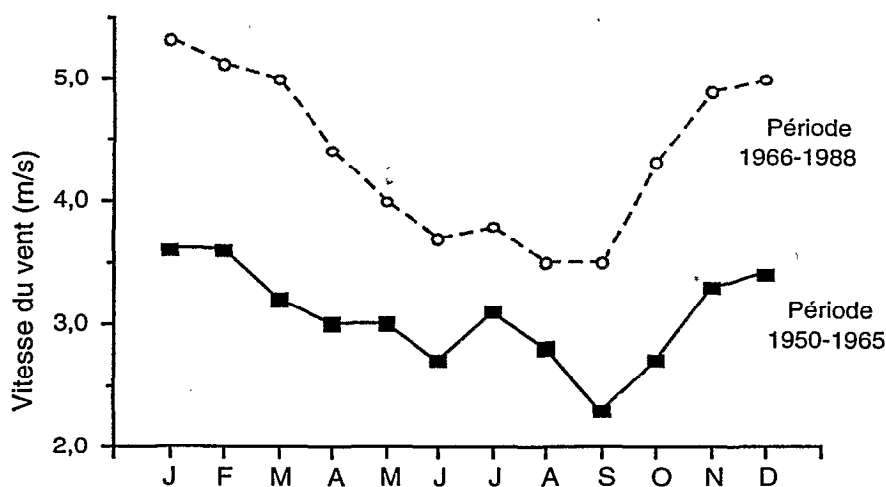


Fig. 2-A.3 Vitesse moyenne mensuelle du vent à Agadez entre 1950 et 1988

4) l'humidité relative de l'air:

Elle apparaît évidemment très influencée par la proximité du milieu désertique: L'importance de la saison sèche, la permanence des fortes températures limitent considérablement le degré d'humidité de l'air dont l'observation s'effectue, comme pour les autres paramètres climatiques, à partir des données de la station d'Agadez (tableau 2-A.8)

Le minimum est toujours relevé en fin d'après-midi, au maximum des températures.

Tab. 2-A.8 Humidité relative à Agadez, période 1961-1988

Humidité (%)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
61-70 max	36	31	28	29	33	45	64	79	60	38	37	37	43
min	12	10	9	10	11	13	21	30	19	14	13	13	15
77-88 max	33	29	26	23	32	46	63	70	54	36	36	37	40
min	11	8	8	7	8	11	19	20	14	11	12	12	12

Le maximum correspond, en saison sèche, aux températures minimales du point du jour; en hivernage il est souvent lié à l'existence de l'averse qui peut saturer momentanément l'atmosphère. Les maxima moyens les plus élevés (60 à 80 %) sont normalement enregistrés entre juillet et septembre, les plus bas (25 à 30 %) en saison sèche, de février à mai. Les minima moyens les plus forts (20 à 30 %) sont comme les maxima enregistrés en hivernage, les minima les plus faibles (10 à 12 %), de même, en saison sèche.

La comparaison des situations, actuelle et antérieure à la sécheresse, fait normalement apparaître une diminution des minima, comme des maxima, en liaison avec l'augmentation générale des températures constatée précédemment (Ch II-A-I-2).

Les écarts les plus importants apparaissent effectivement en saison chaude (avril) et au cœur de la saison humide (août). Dans le cas des maxima, la diminution correspond, en saison sèche, à l'élévation des températures; en saison des pluies, à cette même élévation des températures, associée à une baisse de potentialité des masses d'air humides. Dans le cas des minima, la variation relative est plus sensible en saison sèche comme en hivernage, en liaison

avec l'augmentation des températures, mais aussi vraisemblablement sous l'influence du renforcement d'autres facteurs climatiques, tel le vent.

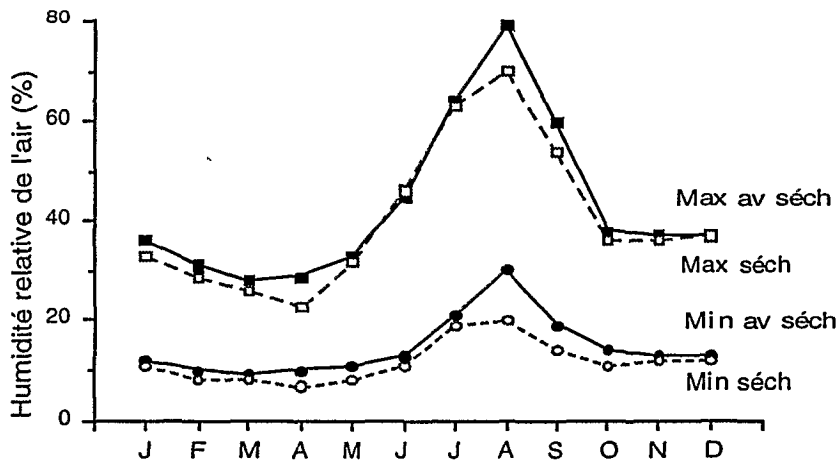


Fig 2-A.4 Evolution des humidités relatives (min et max) de l'air, à Agadez, depuis 1961

Lefèvre (1960) compare les humidités relatives mensuelles enregistrées, durant la décennie 50-60, à Agadez et Iférouane, aux heures caractéristiques de début (6h), milieu (11 ou 12h) et fin de journée (16h ou 18h), figure 2-A.5:

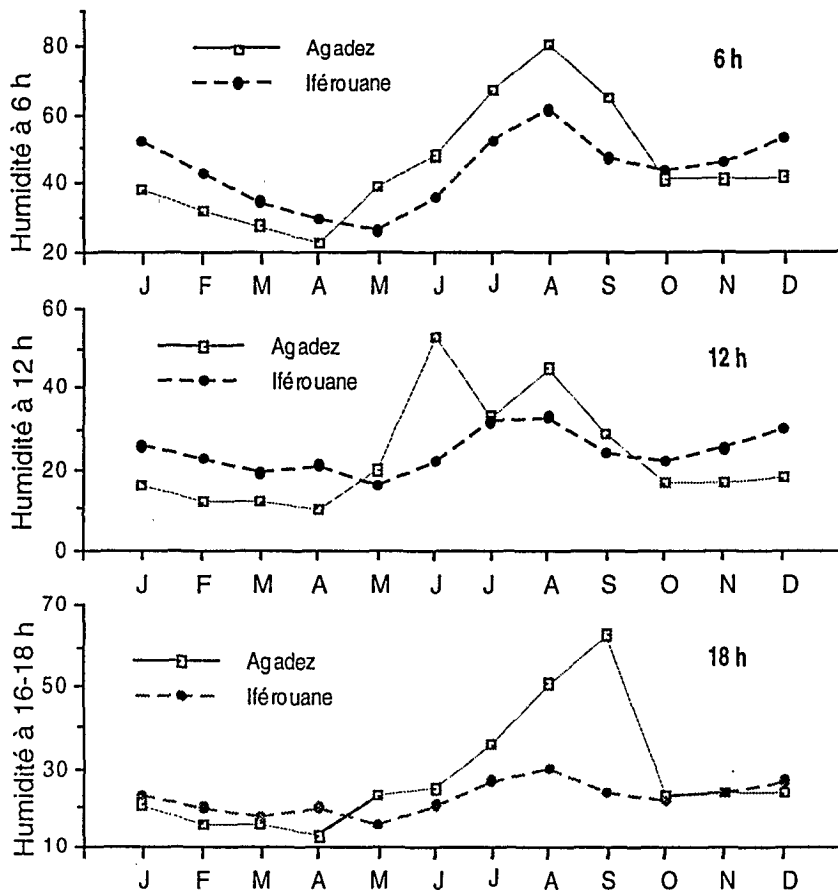


Fig. 2-A.5 Humidité (%) des années 50 à Agadez et Iférouane

En saison fraîche, les humidités relatives d'Iférouane sont supérieures à celles d'Agadez, particulièrement durant la première partie de la journée où les températures sont les moins élevées. Au cours de l'hivernage le phénomène s'inverse; l'influence de la saison des pluies sur ce paramètre apparait beaucoup plus nette à Agadez qu'à Iférouane en raison de la latitude.

L'évolution de l'humidité relative à Agadez reflète particulièrement bien le mouvement des masses d'air de la mousson:

Le premier passage du Front Inter Tropical est figuré par un premier maximum, en milieu de journée, en juin. Le minimum relatif, qui suit en juillet, est lié au glissement vers le nord du FIT. Sa redescente en septembre n'est pas observable à midi, en raison des températures de fin d'hivernage dont la remontée est déjà sensible, mais on l'observe très bien à 18 heures.

Les masses d'air de la mousson n'atteignent la région d'Iférouane qu'en juillet, où elles stationnent jusqu'à fin août, avant de se retirer. La progressivité du mouvement est parfaitement figurée par l'évolution de l'humidité relative, à cette station, à toutes les heures de la journée. L'absence de deux maxima, comme à Agadez, place bien le nord de l'Aïr à l'optimum moyen latitudinal de la mousson guinéenne.

Entre juillet 1975 et avril 1976, la coopération belge (OXFAM) procède, dans le cadre d'une étude agro-pastorale menée dans la région de Tin Telloust (haute vallée du kori Zilalet, au centre-est de l'Aïr), à des enregistrements d'humidité relative.

Ces derniers permettent de constater, encore une fois (tableau 2-A.9, figure 2-A.6) et à travers leur similitude avec ceux d'Iférouane, le renforcement du phénomène d'aridité lié à la position "est" dans le massif.

A Tin Telloust le phénomène est renforcé d'un effet de site (proximité d'un ensellement) permettant aux masse d'air du Ténére, de s'infiltrer une grande partie de l'année.

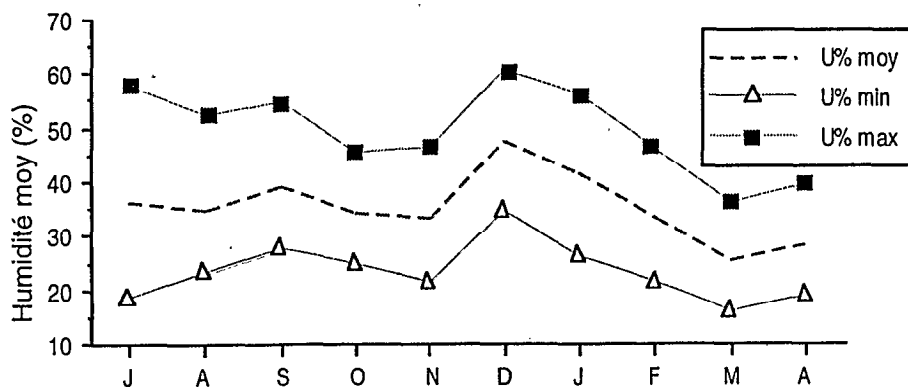


Fig. 2-A.6 Evolution des humidités relatives à Tin Telloust entre juillet 75 et avril 76.

Les valeurs de février, inexistantes, font l'objet, sur la figure, d'un interpolation.

La présence d'un maximum secondaire, en septembre, peut ainsi être expliquée par la redescende du FIT, mais certainement, et surtout, par le calme aérologique qui l'accompagne (cf la vitesse minimale du vent à Agadez au cours de cette période).

Tab. 2-A.9 Humidités à Tin Telloust entre juillet 75 et avril 76

Humid (%)	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Mar	Avr
Min	18,5	23,1	27,9	25,0	21,1	34,4	26,4	15,9	18,7
Moy	36,6	35,3	39,5	34,5	33,6	48	41,8	25,6	28,5
Max	57,5	52,3	54,8	45,3	46,4	60,6	56,4	35,9	39,7

II. L'EVAPORATION:

Elle est la résultante de l'ensemble des facteurs climatiques préalablement observés (température, vent, humidité relative). Son étude s'effectue à partir de deux types de mesures:

Les données de l'évaporomètre Piche sont artificielles puisqu'elles représentent l'évaporation optimale sous abri d'une surface évaporante maintenue à saturation. Mais la simplicité de l'appareillage, et son existence dans la plupart des stations météo fait de l'information qu'il produit une excellente base de comparaison d'un point à l'autre.

L'information "évaporation bac", Colorado ou enterré ORSTOM, qui simule ce que pourrait être le prélèvement sur une nappe d'eau libre, est moins fréquente en raison des contraintes d'installation et d'exploitation du système.

1) Les données disponibles:

La station synoptique d'Agadez permet de disposer d'observations Piche depuis 1953, et Bac depuis 1961. A Iférouane les données Piche existent depuis 1955. Mais les données bac n'ont été recueillies qu'au cours de l'étude hydrologique ORSTOM de décembre 1959 à septembre 1960 (Lefèvre, 1960).

Un certain nombre d'autres postes dont Alarcès, In Doudou, Aoudéras, proposent des données d'évaporation discontinues et limitées dans le temps; seul celui d'Azal présente près de 7 années d'observations Piche continues (An.2-A.II,1). Ces résultats, quoique fragmentaires, permettent d'effectuer des comparaisons quant-aux différentes conditions d'évaporation du massif.

Enfin, à partir des données énergétiques, radiatives et thermiques, de la station d'Agadez, le calcul de valeurs d'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) permettent d'estimer ce que pourrait être localement, dans des conditions optimisées, le prélèvement naturel sur le biotope.

2) Importance et répartition des évaporations:

a) Des valeurs annuelles fortes:

Les mesures d'évaporations effectuées aux différentes stations de l'Air correspondent bien aux conditions d'aridité, décrites précédemment, qui règnent une grande partie de l'année sur le massif.

A Agadez (4154 mm) comme à Iférouane (4347 mm) la valeur moyenne annuelle de l'évaporation "Piche" dépasse déjà quatre mètres durant la période antérieure à 1970, reconnue moins aride. Ces valeurs représentent, respectivement, près de trente fois la pluviosité moyenne annuelle d'Agadez, et quatre vingt dix fois celle d'Iférouane.

Dans le cas de l'évaporation "bac", le rapport est encore plus important pour Agadez, de l'ordre de trente huit fois, mais inférieur à quatre vint fois pour Iférouane. Cette limitation du phénomène "bac" à Iférouane, porte à penser, que ce poste bénéficierait de par son site et (ou) sa situation, d'une protection relative vis à vis du rôle de certains paramètres climatiques incitateurs de l'évaporation.

b) Les évaporations, journalière et mensuelle, sont toujours élevées; tout en présentant d'importantes fluctuations saisonnières:

L'existence de relevés à 7 heures le matin et à 18 heures le soir permet d'apprécier l'intensité du phénomène et l'écart nyctéméral: (fig. 2-A.7)

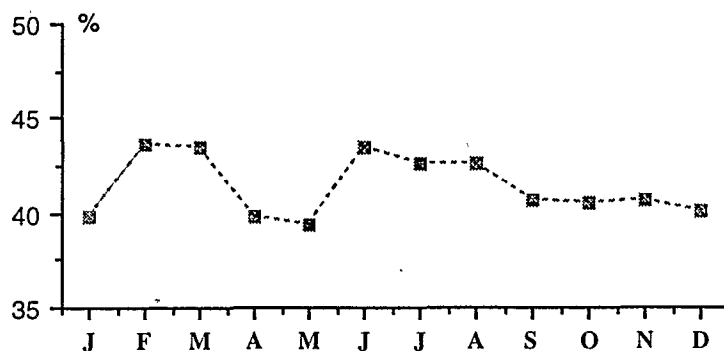


Fig. 2-A.7 Pourcentage d'évaporation piche nocturne au poste d'Azél en 1987

Si on considère l'affaiblissement, ou la disparition nocturne, d'un certain nombre de facteurs favorisant l'évaporation (rayonnement, température, vent) il est intéressant de noter le niveau élevé conservé par le prélèvement nocturne en raison de l'aridité de l'air.

L'évaporation journalière reste supérieure à 10 mm pratiquement toute l'année, comme permettent de le constater le tableau 2-A.10 et la figure 2-A.8 présentant les valeurs moyennes journalières bac et piche d'Agadez au cours de la période 1977-1988.

Tab. 2-A.10 Evaporations piche et bac à Agadez

E (mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Piche	10,3	11,8	13,8	14,6	15,0	13,2	10,1	8,9	11,5	13	11,1	9,7
bac	13,0	14,6	17,3	18,8	19,0	17,0	14,2	13,3	14,9	16,9	14,2	11,7

A l'image des conditions hygrométriques et thermiques, l'évolution de l'évaporation connaît dans le massif deux maxima;

le principal en avril-mai marque l'optimum de la saison sèche et chaude, le secondaire en septembre-octobre correspond au retrait vers le sud des masses d'air de la mousson, à un moment où la course du soleil n'est pas encore trop écartée de son zénith.

Les deux minima s'intercalent en décembre - janvier, au cœur de la saison fraîche, pour des raisons thermiques essentiellement; et en août au plus fort de l'hivernage, les pluies tout en abaissant la température de l'air augmentent alors sensiblement l'humidité relative.

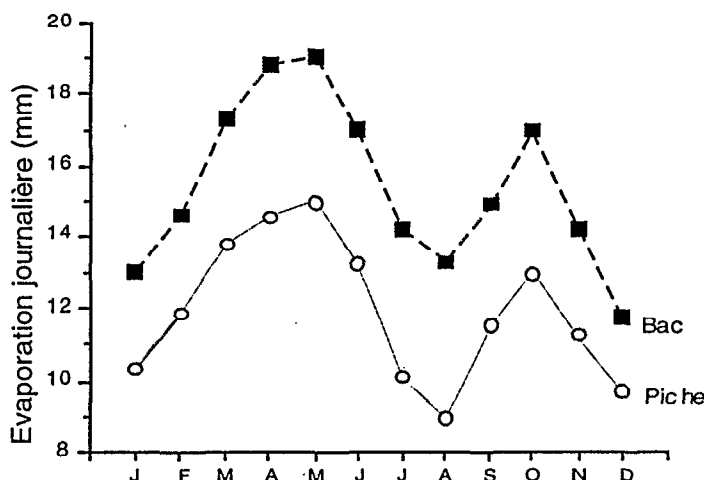


Fig. 2-A.8 Evaporations moyennes journalières à Agadez entre 1977 et 1988

Les valeurs bac apparaissent supérieures toute l'année aux valeurs piche d'environ 20% en saison sèche et froide, mais de 30% et plus au cœur de la saison des pluies en juillet-août. La pente (0,80) de la relation liant les deux évaporations à Agadez au cours de la période 77-88 reste néanmoins conforme à la valeur moyenne reconnue pour la bande sub-désertique (Charre, 1974; Dhonneur, 1985):

$$\text{Evap. Piche} = 0,80 \text{ Evap. bac} - 16 \quad (r = 0,95)$$

L'accroissement de l'écart des valeurs bac et piche au cœur de la saison des pluies constitue apparemment une anomalie dans la mesure où l'augmentation de l'humidité relative et la baisse du régime des vents seraient plutôt des facteurs d'unité des deux systèmes évaporants.

Le rayonnement reste le seul élément de différenciation susceptible d'expliquer ce phénomène également sensible au cours de l'hivernage 1960 à Iférouane (seule année commune d'observations bac et piche), Tab. 2-A.11:

Tab. 2-A.11 Evaporations moyennes mensuelles à Iférouane en 1959-1960

E (mm)	D59	J60	F	M	A	M	J	J	A	S
Piche	234	234	273	389	473	529	488	443	427	409
bac	215	197	224	309	421	464	389	317	353	371

La figure 2-A.9 met en évidence l'infériorité, toute l'année à Iférouane, des valeurs bac par ailleurs beaucoup plus proches des valeurs piche. La relation qui lie les deux types de mesures traduit bien le phénomène, qui est certainement dû à la situation d'abri occupée par ce poste, à proximité des monts Tamgak, qui le protègent, dans le secteur nord-est, des effets de l'Harmattan.

$$\text{Evap. Piche} = 1,13 \text{ Evap. bac} + 22 \quad (r = 0,96)$$

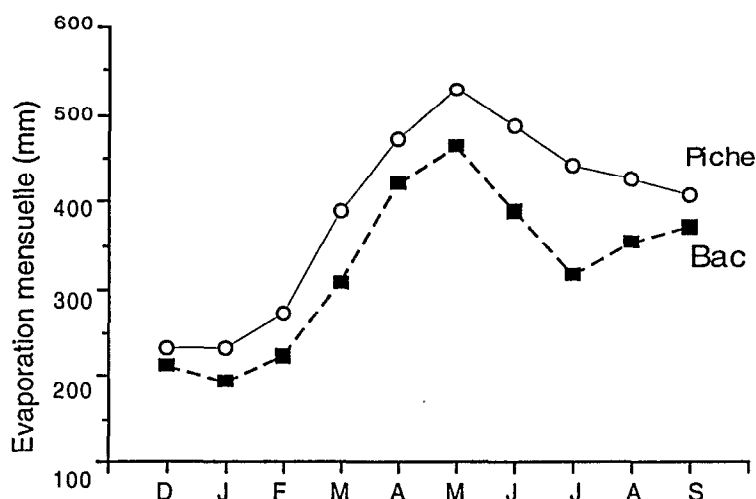


Fig. 2-A.9 Evaporations Piche et Bac à Iférouane en 1959-1960

3) Evolution de l'évaporation:

a) Evolution dans le temps:

Grâce aux données piche du poste d'Agadez, il est possible de suivre l'évolution de l'évaporation depuis les années cinquante dans la région de l'Aïr (Tab. 2-A.12 ; fig. 2-A.10) La première séquence, jusqu'en 1960, est sans doute caractéristique du phénomène avant sécheresse. Au cours de cette période l'évaporation Piche n'est que de 3700 mm par an.

La séquence qui suit, 1961-1970, apparaît déjà très marquée par l'aridité, particulièrement la saison sèche (fraîche et chaude) au cours de laquelle l'augmentation de l'évaporation est de l'ordre de 20 à 30 %; la valeur annuelle dépassant alors 4500 mm.

Tab. 2-A.12 Evaporation Piche (mm) à Agadez de 1953 à 1988

Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann.
53-60	270	297	366	411	403	336	242	171	258	353	309	279	3695
61-70	349	374	458	449	492	416	314	212	321	412	372	352	4521
77-88	318	329	428	437	465	396	314	275	345	404	334	301	4346

La séquence récente 77-88 est marquée par un léger affaiblissement des valeurs de saison sèche, alors que les valeurs de saison des pluies continuent à augmenter, particulièrement celle d'août, en raison de l'accentuation du déficit pluviométrique.

La valeur de l'évaporation annuelle (4350 mm) apparaît en léger recul par rapport à la séquence précédente.

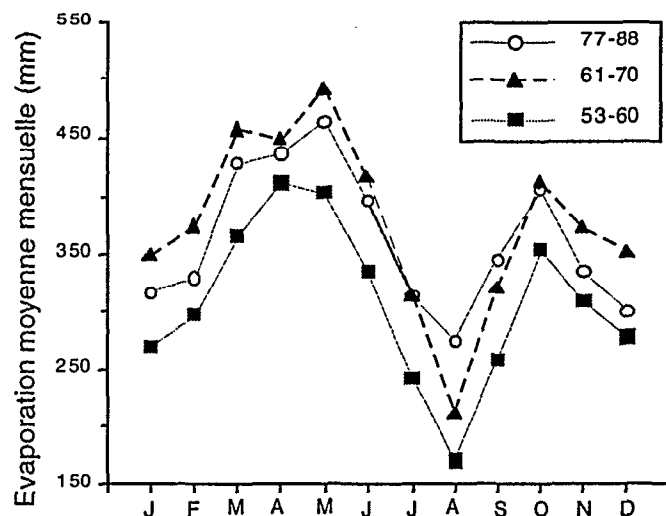


Fig. 2-A.10 Evolution de l'évaporation Piche à Agadez de 1953 à 1988

L'évolution des évaporations annuelles à Agadez au cours de la dernière période (1977-1988), montre que le processus d'aridité était encore actif à la veille des années 90.

Après une situation évaporatoire relativement stable jusqu'en 1982, la période 83-85 est marquée par un fort accroissement du phénomène, dont le point culminant est la grande sécheresse de 1984.

Après une légère diminution en 1986, l'année 88 (lacune en 1987) est témoin d'une nouvelle poussée évaporatoire; tout au moins en ce qui concerne le phénomène bac; la décennie 77-88 voit ainsi ce paramètre progresser de près d'un mètre (fig. 2-A.11)

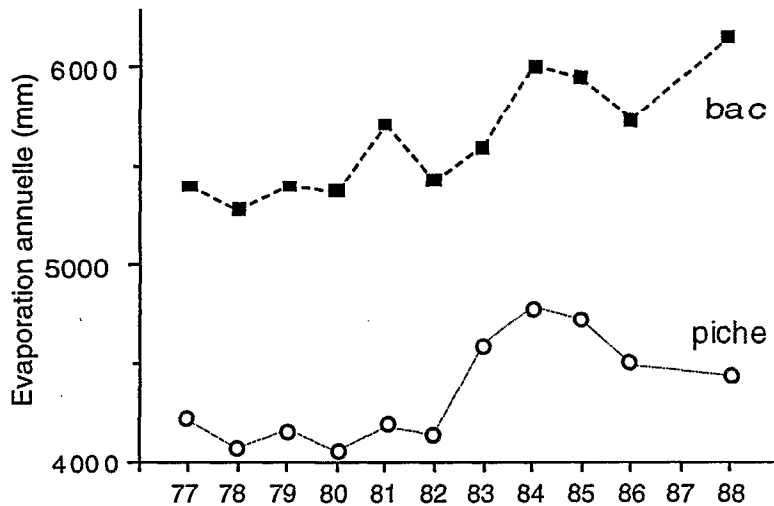


Fig. 2-A.11. Evaporations Piche et Bac à Agadez entre 1977 et 1988

La tendance des valeurs Piche, moins nette en fin de séquence, pourrait être, comparativement, le signal du renforcement du régime des vents ou du rayonnement direct.

b) Evolution dans l'espace:

Les évaporations bac ou piche de trois postes occupant des positions latitudinales différentes et des situations variées dans le massif peuvent être comparées à celles d'Agadez. Le site de la station météorologique d'Agadez (Aéroport) est celui du milieu sablo-argileux de la grande dépression périphérique sédimentaire qui borde le massif au sud-ouest.

– Le poste de la station hydrologique d'Azél est situé à une dizaine de kilomètres seulement au nord-est d'Agadez dans un environnement très différent de reg et de chaos gneissique à patine noirâtre. La période commune d'observation avec Agadez est courte (1984-1988) elle permet néanmoins de montrer que les valeurs d'Azél sont nettement (Tab. 2-A.13) plus élevées toute l'année, 25% en moyenne, que celles d'Agadez, plus particulièrement en hivernage, au moment du passage du soleil au zénith.

Tab. 2-A.13 Evaporations moyennes mensuelles (1984-1988) en mm.

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann.
Azel	397	408	534	588	626	592	508	485	543	593	501	421	6196
Agadez	320	342	448	464	512	448	337	306	434	422	347	311	4691

Compte tenu de la proximité des deux stations, de leur site également dégagé, l'écart de leurs valeurs ne peut s'expliquer que par une différence d'environnement (fig. 2-A.12).

La station d'Agadez est installée sur des sols clairs à fort albédo, alors que celle d'Azél au milieu de son chaos foncé présente un albédo beaucoup plus faible. L'accumulation d'énergie calorifique liée à l'effet de corps noir des matériaux entraîne une augmentation des températures

locales, dont l'effet se poursuit dans la première partie de la nuit, limitant l'humidité relative, et stimulant le pouvoir évaporant de l'air, (cf : 2-b)

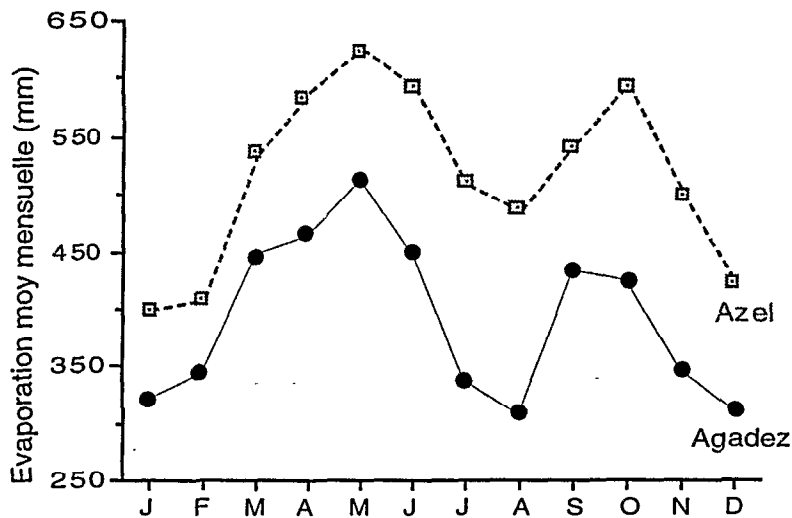


Fig. 2-A.12 Evaporation Piche à Agadez et Azel entre 1984 et 1988

– La station expérimentale sur les techniques d'irrigation en zone sahélienne d'In Doudou est située dans la vallée du Téloua, en rive gauche, sur la terrasse sablo-argileuse du lit majeur, à 23 km en amont d'Agadez. A cet endroit la vallée du Téloua s'encaisse dans les premiers reliefs de l'Aïr, représentés par quelques collines et arrêtes filoniennes dominant la vallée de quelques dizaines de mètres. Une végétation d'Acacias et de Calotropis colonise les berges et la terrasse d'inondation, particulièrement développée à cet endroit.

Cette station propose près de trois années de mesures d'évaporation bac entre 1978 et 1980 qui ont été comparées à celles d'Agadez pour la même période (tab. 2-A.14)

Tab. 2-A.14 Evaporation bac (mm) à In Doudou et Agadez de 1978 à 1980

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann.
I.Doud	235	237	267	353	367	323	312	285	275	265	280	250	3449
Agadez	403	391	558	512	518	444	399	415	443	483	425	364	5355

Les valeurs d'In Doudou apparaissent sensiblement inférieures à celles d'Agadez toute l'année; de l'ordre d'un tiers en valeur moyenne annuelle.

L'évolution moyenne mensuelle montre que le phénomène est particulièrement marqué en saison sèche où les valeurs d'In Doudou sont de 40 à 50 % inférieures à celles d'Agadez pour la même période (fig. 2-A.13).

La raison de cet écart important est vraisemblablement lié à la position d'abri d'In Doudou que les reliefs locaux, même modestes, parviennent à protéger de l'Harmattan. La faible largeur de la vallée, et la densité accrue de la végétation sont également susceptibles de favoriser un micro climat, relativement plus humide qu'en dehors du massif, qui viendrait donc limiter la reprise évaporatoire dans cette partie intermédiaire du cours du Téloua.

L'absence de minimum secondaire en juillet à In Doudou pourrait ainsi être lié à l'existence de ce micro climat dans la vallée du Téloua.

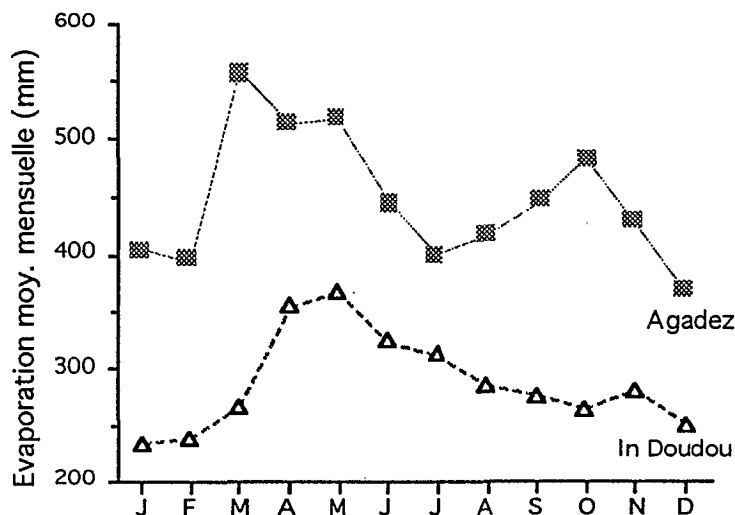


Fig. 2-A.13 Evaporation Bac à Agadez et In Doudou entre 1978 et 1980

– La petite station météorologique du poste administratif d'Iférouane est située au nord de l'Aïr, en rive gauche du kori Tamgak, à sa sortie du massif du même nom. La structure puissante de l'Adrar Tamgak (plus de 1000 mètres de dénivellée) constitue à l'est une barrière aussi proche (quelques kilomètres) que massive.

La comparaison des évaporations moyennes mensuelles piche de cette station avec celles d'Agadez au cours de la période mixte 1953-1970, couvrant à la fois la pré-sécheresse et le début de cette dernière, confirme bien la différence des conditions climatiques, déjà soulignée précédemment, existant entre le sud et le nord du massif (tab. 2-A.15)

Tab. 2-A.15 Evaporation piche (mm) à Iférouane et Agadez de 1953 à 1970

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann.
Iféroua	230	259	371	442	503	471	444	358	384	365	283	237	4347
Agadez	314	340	417	432	452	380	282	194	293	386	344	320	4154

Bien que situé dans un milieu où l'aridité est sensiblement plus élevée, l'évaporation annuelle est peu supérieure à Iférouane; 4350 mm pour 4150 mm à Agadez.

En saison fraîche, l'évaporation est sensiblement moins élevée à Iférouane en raison des températures plus basses et de la position d'abri vis à vis de l'Harmattan. Avec l'arrivée de la saison chaude, une inversion s'opère progressivement en raison des températures plus élevées, et du degré d'humidité plus faible d'Iférouane. Au cours de la saison des pluies l'écart des valeurs se creuse jusqu'en août, en liaison avec l'importance moindre de la saison des pluies au nord du massif. Le retour de la saison sèche est marqué par un renversement de situation, les valeurs d'Agadez étant à nouveau les plus élevées dès octobre (Fig. 2-A.14).

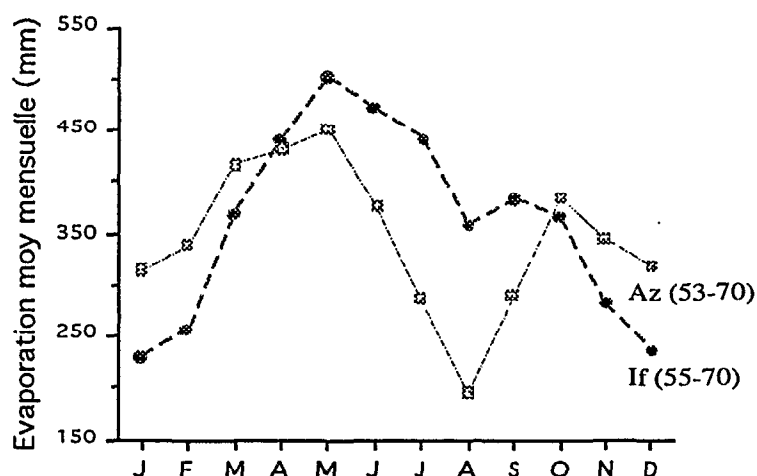


Fig. 2-A.14 Evaporation Piche à Agadez et Iférouane entre 1953 et 1970

L'évolution de l'humidité relative permet de suivre le déroulement de la saison des pluies du sud au nord du massif:

A Agadez l'influence des masses d'air de la mousson est déjà très sensible en juin, alors qu'à Iférouane le pouvoir évaporant de l'air est encore proche du maximum. Le minimum de saison des pluies se situe en août sur les deux sites; mais il revêt une importance différente d'Agadez, où il apparaît principal, à Iférouane, où il n'est que secondaire. L'écart des valeurs d'Août aux deux stations dépasse 150 mm.

Le maximum secondaire survient dès septembre à Iférouane en raison du retrait plus précoce des masses d'air de la mousson. A Agadez ce maximum secondaire n'apparaît qu'un mois plus tard, et son importance relative est considérablement plus élevée.

Ce parallèle entre l'évaporation à Agadez et à diverses positions dans le massif met en valeur la grande importance des conditions locales (situation d'abri, environnement, albédo) sur le phénomène. Dans le nord, à Iférouane, le rôle de la mousson apparaît très affaibli, et celui des effets locaux, enregistrés plus au sud, tout à fait relatif, devant l'effet de latitude.

4) L'évapotranspiration potentielle (ETP):

C'est une valeur théorique, intéressant plus particulièrement l'agronomie, qui exprime la quantité d'eau maximale cédée à l'atmosphère par un sol couvert de végétation, dont l'état hydrique est maintenu à saturation.

Son calcul est fondé sur l'utilisation préférentielle de paramètres, variables suivant les auteurs; énergétique pour Penman, radiatif pour Turc, thermique pour Thornthwaite...

Bien que n'étant pas la valeur la plus aisée à obtenir, l'évapotranspiration Penman est la plus complète, et la plus largement proposée par les stations météorologiques, comme celle d'Agadez. Giazzi propose en 1990 un calcul d'ETP Turc à Agadez pour la période 1953 - 1982.

Le tableau 2-A.16 présente les valeurs moyennes mensuelles d'évapotranspirations obtenues à Agadez suivant les deux méthodes;

Tab. 2-A.16 ETP Penman et Turc à Agadez

Evap (mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Penman (78-88)	188	200	254	249	259	237	231	224	218	229	199	183
Turc (53-82)	167	202	227	252	251	233	197	172	196	217	184	158

dont la courte période commune (78-82) pour comparaison; tab. 2-A.17, fig.2-A.15.

Tab. 2-A.17 ETP Penman et Turc à Agadez, période commune 78-82

Evap (mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Penman	166	181	228	232	239	220	220	216	210	210	215	199
Turc	176	207	235	262	237	206	183	179	223	222	186	160

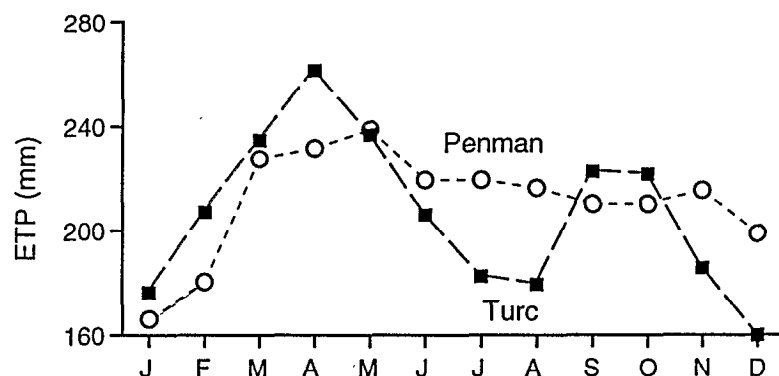


Fig. 2-A.15 Evapotranspirations potentielles Penman et Turc à Agadez entre 1978 et 1982

Les variations de l'ETP Turc apparaissent beaucoup plus sensibles que celles de l'ETP Penman, en particulier en saison des pluies, car basées sur des variations sensibles de températures; alors que les variations énergétiques qui prédominent dans le calcul de l'ETP Penman sont moindres à cette époque là.

Une expérience de bioclimatologie (Monteny et al., 1981) réalisée en 1990 à Azel durant l'hivernage, en collaboration avec B. Monteny et un normalien stagiaire, permet d'obtenir, pour ce milieu de reg et de tors, caractéristique des états de surface de l'intérieur de l'Aïr, une assez bonne estimation des paramètres entrant dans le calcul de l'évapotranspiration Penman locale.

L'appareillage était constitué:

– de capteurs hémisphériques mesurant à 1,5 mètre les divers rayonnements (incidents et réfléchis) qui permettent le calcul du bilan énergétique,

- de tentiomètres qui mesurent sur ce même support à 1,5 m, les pressions de vapeur (saturante et réelle) nécessaires à l'établissement de l'humidité relative,
- de thermomètres, à 1,5 m et en subsurface du sol, permettant de contrôler la température de la surface et de son environnement.

L'acquisition au pas de temps de deux heures dure quinze jours entre le 17 et le 31 juillet, après installation et calage des appareils. Au cours de cette période, quatre jours connaîtront un épisode pluvieux (averse orageuse de fin de journée), dont il est intéressant d'observer l'effet, au travers des données des 19 et 20 juillet (figure 2-A.16)

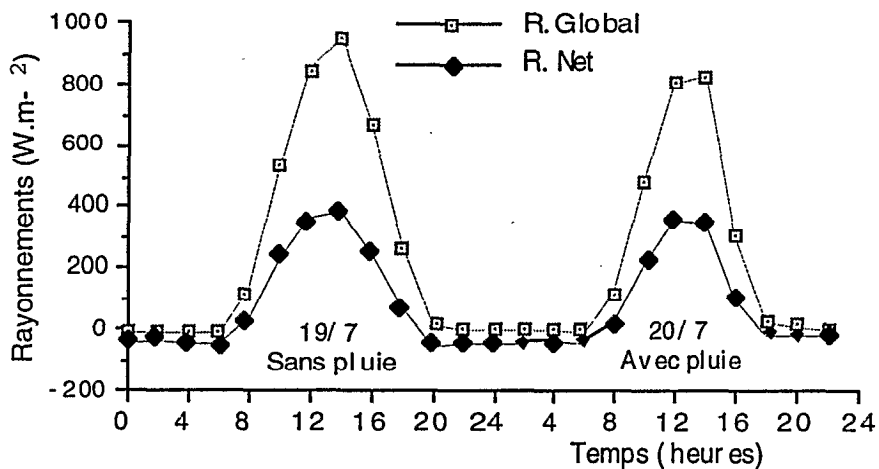


Fig. 2-A.16 Evolution des rayonnements global et net à Azel

La première journée est sans pluie; la seconde reçoit 15,1 mm. Les valeurs du rayonnement apparaissent peu affectées jusqu'en milieu de journée le 20; puis très progressivement à partir du début de l'après midi, avec l'apparition des premiers nuages dans le ciel. A partir de 16 heures il est limité à plus de 50%, et à 18 heures, heure habituelle des précipitations, l'effet de la couverture nuageuse est maximum, le rayonnement global est proche de zéro avec deux heures d'avance par rapport à la veille.

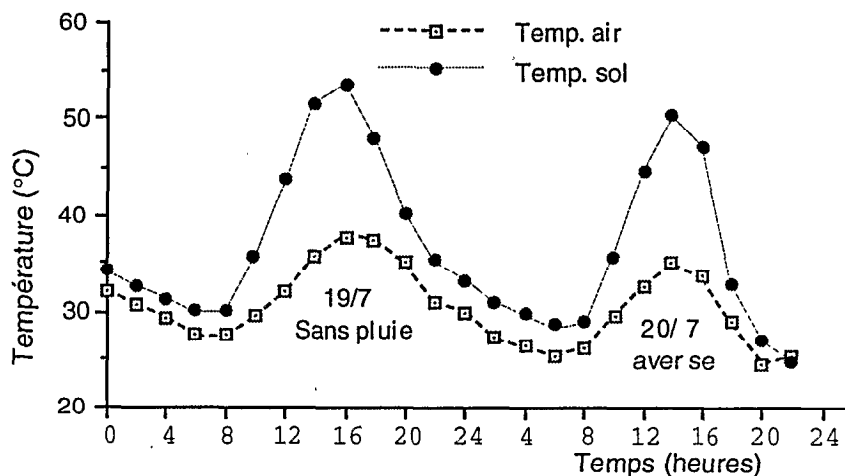


Fig. 2-A.17 Variation des températures, sol et air, à Azel en 1990

L'évolution comparée des valeurs au sol, et au dessus de sa surface, montre qu'à son maximum à 16 heures, la température du reg est près de 20 °C plus élevée que celle de l'air. Ces fortes valeurs de surface, qui approchent 60 °C certains jours, vont participer aux heures chaudes à l'échauffement des basses couches de l'atmosphère, favorisant ainsi les ascendances. Sur le graphique précédant les températures n'apparaissent pas affectées jusqu'à midi le jour de la pluie, le ciel restant généralement clair jusqu'en milieu de journée sur le sud du massif. Par la suite elles diminuent relativement à l'importance de la couverture nuageuse. A partir de seize heures la baisse de température s'accroît, 5 à 6°C au sol comme dans l'atmosphère. A l'heure de la pluie, la différence atteint 10°C dans l'air, mais dépasse 15°C au sol (fig. 2-A.17)

Cette différence air-sol est particulièrement intéressante dans la mesure où elle traduit la consommation d'énergie de la reprise évaporatoire, qui est permanente dans ce milieu, où l'atmosphère saturée n'est jamais qu'un état, aussi fugace qu'exceptionnel.

Par rapport aux autres évapotranspirations (Turc ou Thornthwaite) celle de Penman est la plus complète puisqu'elle fait appel, simultanément, à trois types de paramètres climatologiques: radiatif, dynamique, tensiométrique.

$$ETP_{Penman} = a.R_n + b (1 + 0,54 V) (E_w - e)$$

- Où R_n = Rayonnement net (w.m-2) a (cte météo régionale) : 0,76
 V = Vitesse du vent (m.s-1) b (cte météo régionale) : 0,26
 E_w = Tension de vapeur saturante de la surface évaporante (hPa)
 e = Tension de vapeur de l'air au dessus de cette surface (hPa)

L'expérience bioclimatologique entreprise à Azel en juillet 1990 devait permettre d'établir la relation locale, fonction du milieu, qui lie rayonnement net et rayonnement global:

$$R_n = 0,454 R_g - 33,8$$

Mais le rayonnement global est aussi lié à l'importance de l'insolation, et en particulier, au quotient d'insolation (durée d'insolation / durée maximale possible; cf tab.2-A.1), assimilable à Azel à celui de la station d'Agadez (située à une dizaine de kilomètres seulement). La simple connaissance de la durée d'insolation à la station d'Agadez permet donc d'apprécier la valeur du rayonnement net à Azel.

De même, la vitesse du vent à la station ORSTOM, pour la même raison de proximité et d'absence de relief, peut être valablement assimilée à celle enregistrée à Agadez.

Enfin la différence de tensions de vapeur ($E_w - e$) peut être calculée à la station d'Azel à partir des mesures de température et d'humidité relative. Les tables donnant les valeurs de tension de vapeur saturante (E_w), en fonction de la température, la relation liant l'humidité relative aux tensions de vapeur ($U\% = \frac{e}{E_w}$) permet d'obtenir la tension de vapeur atmosphérique "e", et de déterminer le dernier terme ($E_w - e$) de la relation de Penman.

Ainsi donc, à partir:

.de l'expérience de 1990 ayant permis d'établir la relation, dans l'environnement d'Azél, entre le rayonnement net et le rayonnement global,

.des mesures de températures et d'humidité pratiquées à Azél (Annexe 2-A.II,1),

.et des données de proximité de la station d'Agadez (vitesse du vent, ensoleillement),

une reconstitution de l'ETP Penman à la station d'Azél, caractéristique de l'environnement minéral sud du massif, est proposée pour la période 1984-1990 (Tab.2-A.18).

Tab. 2-A.18 Reconstitution de l'ETP Penman à AZEL, période 1984-1990

ETP (mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1984				294	312	262	260	277	241	288	256	221
1985	203	202	239	243	247	230	222	207	245	253	205	206
1986	220	219	300	294	309	283	230	228	211	244	184	151
1987	208	185	174	125	235	281	184	231	250	254	198	227
1988	189	201	202	259	236	259	171	178	236	236	206	206
1989	173	130	129	235	207	253	242	205	259	230	165	215
1990	218	151	123	221	244	245	222	223				

La figure 2-A.18 présente l'évolution de cette ETP à Agadez et à Azél au cours de la période commune 1984-1988. La comparaison de ces ETP et des évaporations Piche de la même période (fig. 2-A.12) montre une sensible infériorité des premières; ce qui apparaît pour le moins singulier, si on considère que l'ETP représente en principe l'optimum des conditions locales. Il est donc vraisemblable que les valeurs des constantes retenues régionalement soient, tout au moins dans le contexte actuel, sous estimées.

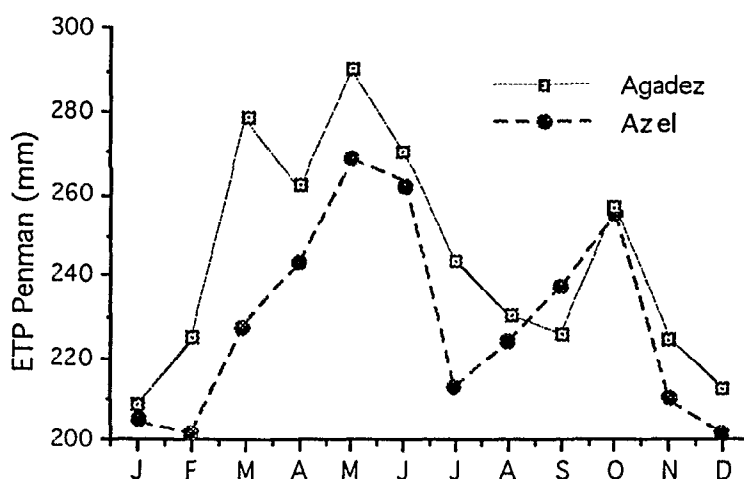


Fig. 2-A.18 ETP Penman à Azel et Agadez entre 1984 et 1988

La même comparaison avec les données Piche fait d'autre part ressortir des valeurs d'ETP contradictoires; inférieures à Azel, une grande partie de l'année, à celles d'Agadez.

Dans le calcul de l'ETP Penman, différents membres sont susceptibles d'expliquer un écart entre les deux stations:

– Le rayonnement net, compte tenu de l'environnement de la station moins favorable à l'albédo, serait plus élevé à Azel, constituant ainsi un élément contradictoire à la prééminence des valeurs d'Agadez.

– La déviation dont serait l'objet les vents de basse altitude, au contact des premiers incidents du relief, s'accompagne vraisemblablement d'une accélération dont profiterait surtout la cuvette d'Agadez; la station d'Azel, derrière son arête filonienne, même délabrée, se trouvant relativement abritée de cet effet.

– La différence de tension de vapeur apparaît également comme un élément pouvant expliquer le phénomène:

Le terme " $E_w - e$ ", inférieur à Azel, suppose une valeur de tension de vapeur " e ", supérieure à cette station. Cette supériorité pourrait être reliée à la proximité du kori Téloua; ce dernier entretenant, par l'intermédiaire de sa nappe alluviale et de sa maigre végétation, un micro climat local.

Cet écart d'ETP entre Agadez et Azel est à rapprocher de celui des évaporations bac constatées entre Agadez et In Doudou, pour lequel les mêmes raisons de micro climat avaient été avancées. Durant une grande partie de l'année la vallée du Téloua, en raison de son faible développement transversal, profite d'un état d'humidité légèrement plus favorable que l'environnement minéral aride des interfluves. A sa sortie du massif, le Téloua s'étale dans une vaste dépression périphérique (Cuvette d'Agadez), qui ne peut prétendre bénéficier des mêmes avantages d'humidité relative. En fin de saison des pluies, l'écart se réduit, car la succession des écoulements et des infiltrations dans la cuvette finissent par faire profiter cette vaste zone des mêmes avantages d'humidité que la vallée en amont.

5) L'évaporation des sols:

Compte tenu de la faible densité de la végétation et de sa particulière adaptation (pour les plantes pérennes, tout au moins) à la sécheresse, les phénomènes d'évapotranspiration sont essentiellement liés aux sols. Dans le paragraphe IV sur les sols (chapître I, A) nous avons vu que, parmi les différentes formations, seules celles des fonds de vallées alluviales étaient susceptibles de permettre des échanges notables à l'interface sol-atmosphère.

Divers auteurs (Aranyossy et al, 1991; Barnes et Allison, 1982, 1983, 1984, 1988; Fontes et al, 1986; Taupin, 1990; Zouari et al, 1985...) ont étudié, tant sur le terrain qu'en laboratoire, l'évaporation de la zone non saturée sous couvert sableux en milieu aride, qui représente l'essentiel des phénomènes d'échanges dans l'Aïr. Car la saturation de la nappe alluviale des talwegs, à la suite des écoulements, ne constitue qu'un état transitoire très court, ou limité spatialement à l'effet d'un barrage, naturel ou anthropique, sur l'inféoflux.

Ces études réalisées grâce à l'outil isotopique mettent en évidence la décroissance très rapide du flux évaporatoire en fonction de la profondeur. Que ce soit dans la région de Niamey en milieu sahélien (JD Taupin) ou dans l'erg de Bilma en milieu hyper-aride (JF Aranyossy) fig. 2-A.19, l'évaporation est très sensible jusqu'à 0,80 mètres de la surface du sol. Au delà son influence décroît très rapidement et devient à peu près nulle à 1,30 m.

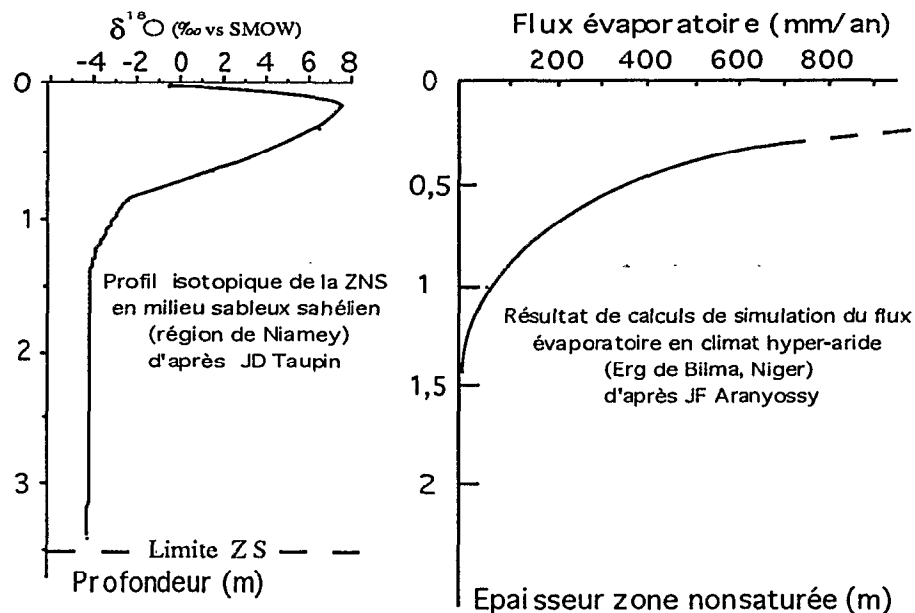


Fig. 2-A.19 Evaporation dans la zone non saturée

L'évolution isotopique positive des vingt premiers centimètres (enrichissement) correspond à la zone de transfert de flux en phase vapeur, lorsque le régime évaporatoire est long et intense. Au delà, la décroissance (appauvrissement isotopique) correspond à la zone de transfert du flux liquide (Taupin, 1990).

La courbe de décroissance du flux évaporatoire en fonction de la profondeur a une allure exponentielle:

$$E = E_0 e^{-kh}$$

où h est la profondeur de la zone saturée,

E_0 l'évaporation potentielle,

k un paramètre de forme caractérisant la résistance du sol au transit de l'eau.

Nous verrons plus avant que la rapide infiltration des eaux d'écoulement dans les sables des lits alluviaux, associée à la limitation de l'évaporation à une faible épaisseur de la zone non saturée, assurent à la signature isotopique des eaux de la nappe une valeur conservatrice qui constitue une des qualités de cet outil.

III. LA PLUIE:

Compte tenu du milieu physique et du caractère saisonnier et ponctuel des phénomènes hydrologiques de l'Aïr, deux niveaux d'étude de l'information pluie apparaissent plus particulièrement intéressants:

.Celui de la pluie annuelle, qui détermine le volume des apports, et indirectement la potentialité de recharge des nappes; qui permet de situer statistiquement l'année, et la (ou les) tendances de la série.

.Celui de la pluie journalière, assimilable à l'évènement orageux de fin de journée, qui détermine la crue, et qui conduit, en liaison avec les intensités, à l'établissement de tout type de relation pluie-débit sur le bassin.

1) Les données disponibles:

Dans l'Aïr les postes pluviométriques observés (type *association* de 400 cm²) ont été nombreux, mais leur fréquence d'observation et leur durée d'utilisation se révèlent très variables:

– Trois postes du réseau, seulement, présentent plus de 40 années d'observation:

.Agadez, qui fait partie d'une station météo synoptique, date de la création du réseau nigérien, 1921.

.Le pluviomètre d'Iférouane a été installé avec le poste administratif en 1940,

.Celui d'El Méki, lié à la création d'un centre d'extraction de cassitérite, existe depuis 1950.

– Des postes comme Tabelot, Timia, Tchirozérine, Tin Tellous, Aoudéras..... ont été créés, dans les années soixante, pour répondre à des besoins d'aménagements ou dans le cadre d'études ponctuelles:

. Les postes installés, comme pour les études ORSTOM de 1959-1960 ou de 1976-1978, n'ont été que des totalisateurs, ou n'ont fait l'objet d'observations que sur quelques années (Assodé, Tchirozérine, Zilalet, Anou-Makaren...)

. mais d'autres, comme Timia, Tabelot, Aoudéras, présentent en 1990 vingt cinq années d'observations à peu près continues.

. Le cas du bassin du Téloua est particulier; étudié depuis 1975, une dizaine de ses postes pluviométriques ont été observés régulièrement; au pas de temps journalier, ou mensuel.

– Enfin, certains postes enregistreurs installés sur les bassins versants, permettent de disposer d'informations sur la morphologie et l'intensité des averses.

L'annexe 2-A.III,1 fait le point sur la situation des postes et le type d'information pluviométrique disponible sur le massif et son environnement (Ténére et nord-Aïr). Elle précise également l'origine et la durée de ces informations.

2) La tendance actuelle:

A partir des totaux pluviométriques annuels de l'Aïr, il était intéressant de vérifier si la période de sécheresse qui marque le Sahel depuis la fin des années soixante, en amputant les pluviométries de 20 à 50 %, était en phase, et aussi sensible, dans ce milieu d'altitude.

Une technique simple et significative d'investigation consiste à observer, pour les postes de longue durée, la relation graphique liant le cumul des pluies annuelles au temps.

Lorsque la période climatique est stable, la relation est linéaire, et la pente de la droite représente la tendance moyenne des précipitations de la séquence observée. Toute variation de pente signalera un changement de tendance pluviométrique; à une pente plus forte correspondra une période plus humide, à une pente plus faible une période plus sèche.

Les figures 2-A.20 à 23 présentent, suivant cette technique, pour les postes de longue durée Agadez, El Méki, Iférouane, et pour le poste de Tabelot, moins longuement observé, mais représentant la tendance "Est" du massif, l'évolution de la pluie annuelle dans l'Aïr.

a) La tendance Sud-Aïr est figurée par l'évolution de la pluie annuelle cumulée au poste d'Agadez (fig. 2-A.20)

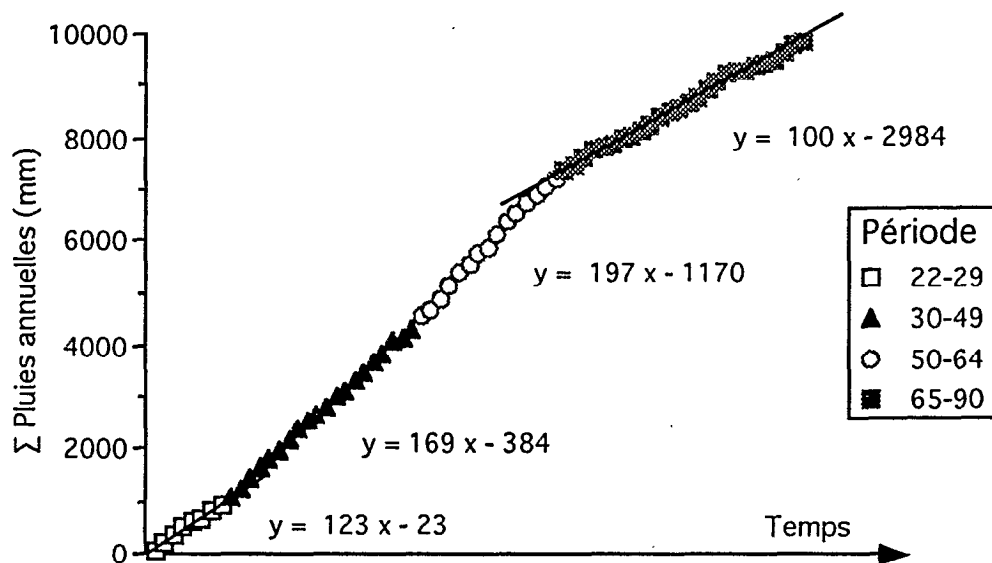


fig. 2-A.20 Précipitations annuelles cumulées d'Agadez depuis 1922

La série présente trois inflexions depuis 1922:

- la première, en 1929, marque le début d'une période plus humide que la précédente jusqu'en 1949, (Pmoy = 167 mm sur 20 ans; 1942 manque).
- la seconde, en 1950, marque une accentuation de la tendance humide, jusqu'en 1964, (Pmoy = 194 mm sur 15 ans).
- la troisième, à partir de 1965, marque, avec environ trois ans d'avance sur la zone sahélienne, le début de la longue période de sécheresse qui se poursuit en 1990, (Pmoy = 103 mm sur 26 ans).

Si on considère globalement la période, la moyenne est de 143 mm sur 69 ans. Compte tenu de la sévérité et de l'extension de la sécheresse actuelle, la question se posera bientôt du choix d'une période "normale" de référence pour un calcul prévisionnel:

Lorsque le nombre d'années "déficitaires" observées dépassera celui des années "excédentaires" il deviendra possible de considérer la séquence "sèche" comme normale; car la série complète, dans le contexte actuel, majore la pluviosité de près de 30 % .

b) La tendance moyen-Aïr est représentée par l'évolution aux postes d'El Méki et de Tabelot:

– La série El Méki est représentative de la partie au vent du massif. Les observations n'ayant commencé qu'en 1950 (fig. 2-A.21), au début des années quatre vingt la série ne comporte qu'une inflexion entre une séquence relativement humide, jusqu'en 1963 (dont la moyenne est de 186 mm sur 14 ans), et la séquence sèche actuelle, qui débute en 1964 avec un an d'avance sur Agadez (dont la moyenne n'est plus que de 94 mm sur 22 ans).

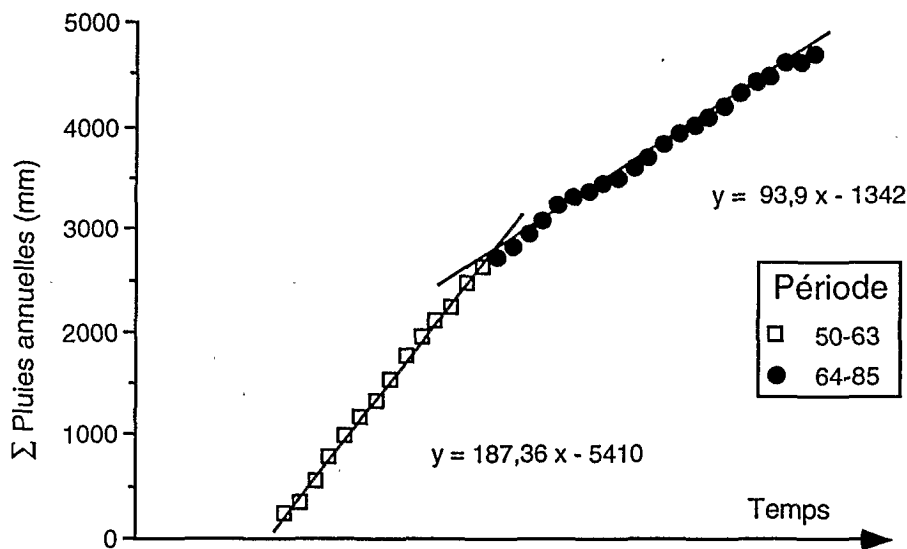


fig. 2 - A.21 Précipitations annuelles cumulées d'El Méki de 1950 à 1985

– la série Tabelot est représentative des phénomènes de la partie Est du massif.

Les observations, qui n'ont commencé qu'en 1968, ne comprennent donc potentiellement que la dernière séquence sèche. A partir de cette date, les autres séries de l'Aïr présentent une tendance assez stable, même si à Agadez, comme à Iférouane, on trouve au début des années 1980 des fluctuations à court terme faisant succéder à quelques années de pluviosité plutôt favorable (1979 à 1981) des années particulièrement sévères comme 1984 (fig.2-A.22)

Dans la situation d'abri pluviométrique de l'Est du massif, ces fluctuations sont plus particulièrement sensibles à Tabelot où après une séquence sèche 1968-1972 (Pmoy = 46 mm) qui n'est peut-être que la fin d'une période plus longue, comme à Agadez, la tendance est, durant onze années, jusqu'en 1983, moins défavorable (Pmoy = 57 mm).

Les quatre années qui suivent, jusqu'en 1987, marquent un court mais très sévère retour à la sécheresse ($P_{moy} = 19 \text{ mm}$). Les années 1988-1989 semblent s'inscrire dans le prolongement (pente équivalente) des années moins défavorables 1973-1983; en raison surtout de l'année 1988, exceptionnellement excédentaire avec ses 164 mm.

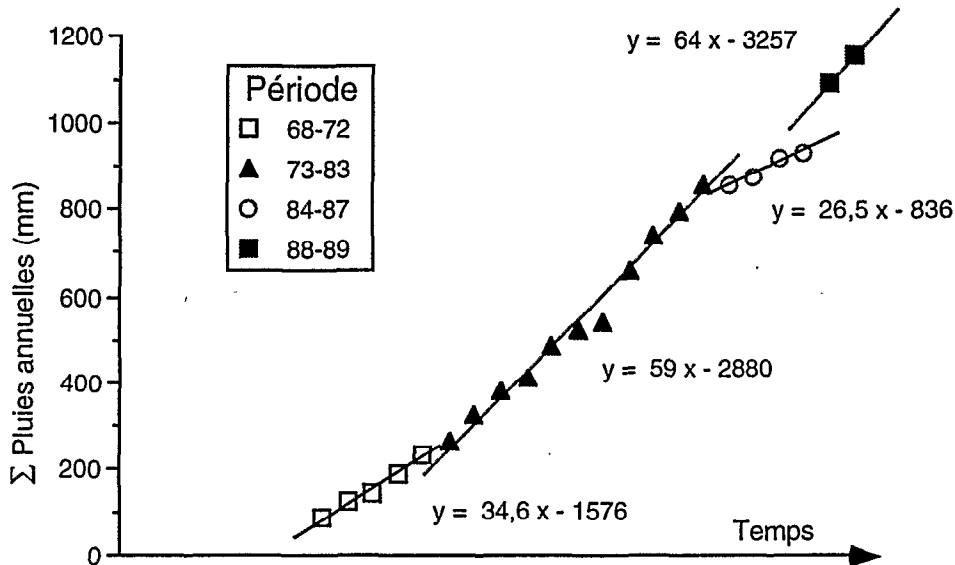


fig. 2 - A.22 Précipitations annuelles cumulées à Tabelot de 1968 à 1989

La moyenne pluviométrique de Tabelot, sur 23 ans, n'est que de 52 mm. Cette valeur apparaît faible par rapport à celle d'El Méki (88 mm pour la même période), situé approximativement à la même latitude à l'Ouest, et beaucoup plus proche de celle d'Iférouane (41 mm) à 100 km au nord.

Ces comparaisons mettent bien en valeur la position d'abri de la partie Est du massif. Lefèvre en 1960, qui observe la pluviométrie de la région de Timia, note une différence très importante entre la partie ouest, au vent de la mousson, du mont Egalah (80 mm), et la partie est sous le vent (28 mm).

c) La tendance Nord-Aïr est représentée par le poste d'Iférouane (Fig. 2-A.23)

L'affaiblissement des totaux précipités est continu depuis le début des années 50 (Pluviosité annuelle moyenne 55 mm). Deux points d'inflexion individualisent trois secteurs successifs de pentes décroissantes:

- La pluviométrie moyenne de la première séquence, la plus abondante, est de 75 mm sur 13 ans, de 1942 à 1954.
- La deuxième séquence entre 1955 et 1969 marque une première, et très sensible, chute de la tendance moyenne avec seulement 52 mm sur 15 années.
- La troisième séquence qui démarre en 1970, et se poursuit encore aujourd'hui, signale un nouvel affaiblissement, puisque la moyenne pluviométrique des 21 dernières années tombe à 43 mm. Mais les écarts à la moyenne de cette séquence

sont très importants: des années sévères comme 1970, 1984 ou 1985, alternent avec des années moins défavorables comme 1980 ou 1981.

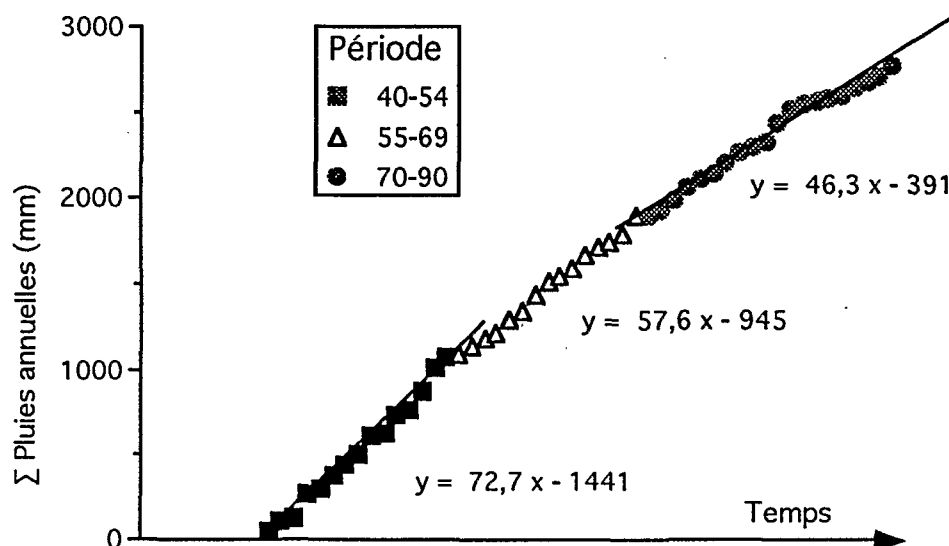


Fig. 2 - A.23 Précipitations annuelles cumulées d'Iférouane depuis 1940

Affaiblissement et irrégularité croissants de cette dernière période sont caractéristiques de l'accentuation de l'aridité.

Cette première approche de la pluie annuelle permet donc de confirmer que la sécheresse s'est installée, logiquement dans l'Aïr et le milieu subdésertique (Carbonnel et Hubert, 1985; Hubert et Carbonnel, 1986), avec quelques années d'avance sur celle de la bande sahélienne: trois à quatre années pour Agadez, cinq pour Elmeki, mais avec près de quinze ans pour le poste d'Iférouane, marqué également par une forte irrégularité interannuelle.

L'affaiblissement de 25 à 30 % de la moyenne de la dernière séquence sèche dans le milieu subdésertique apparaît aussi nettement que dans la bande sahélienne, même si ses effets sont, en valeur absolue, moins spectaculaires, compte tenu de valeurs de référence déjà sévères. Cette tendance est confirmée par l'étude statistique menée sur les quatre stations les plus longuement observées de l'Aïr.

3) Les pluies annuelles:

a) Distribution des précipitations annuelles:

Elle a été étudiée à partir des quatre postes les plus longuement observés de l'Aïr qui, de par leur situation, assurent une assez bonne représentativité de la pluviosité du massif.

Le logiciel Dixlois développé à l'ORSTOM (Lebel et Boyer, 1987) a permis de sélectionner, suivant la méthode du maximum de vraisemblance, avec l'aide des tests de "B. Moret" et du "Chi 2", et grâce à la qualité des ajustements graphiques donnés en annexes (2-A.III, 2&3), les lois qui représentaient la meilleure adéquation aux pluies considérées (en gras).

– La séquence dite "normale" prend en compte la totalité de l'échantillon:

Le tableau 2-A.19 présente pour les quatre postes, les valeurs caractéristiques de la distribution (moyenne, écart-type), les choix d'adéquation, et les valeurs calculées, pour cette loi, correspondant aux fréquences théoriques habituellement retenues en fonction de la taille de l'échantillon.

Tab. 2-A.19 Distributions statistiques des pluies annuelles de l'Aïr

POSTES/FREQUENCES	AGADEZ	EL MEKI	TABELOT	IFEROUANE
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	Fuites	Gauss	Gumbel	Galton
Suivant tests et ajust. graph.	Gauss	Fuites	Pearson III	Pearson III
Moyenne	144,9	130	52,9	52,8
Ecart-type	58,1	58	35,4	33,5
Taille échantillon	71	36	23	51
f= 0,01 (centenale sèche)	(33)	-	-	-
f= 0,02 (cinquantenale sèche)	42	(13)	-	11
f= 0,05 (vingtenale sèche)	56	36	9	15
f= 0,10 (décennale sèche)	71	57	16	19
f= 0,50 (un an sur deux)	138	130	47	44
f= 0,90 (décennale humide)	227	203	96	100
f= 0,95 (vingtenale humide)	256	224	115	127
f= 0,98 (cinquant. humide)	290	(248)	-	165
f= 0,99 (centenale humide)	(314)	-	-	-

La bonne adéquation pour les stations sud et centre Aïr de la loi de Gauss (fig. 2-A.24) montre le caractère régulier des distributions de la pluie annuelle. Par contre à l'est et au nord du massif le choix de lois, dites "des valeurs extrêmes" (Gumbel, Pearson III), souligne leur caractère irrégulier; fig. 2-A.25 extraite, comme la précédente, des annexes 2-A.III,2 & 3.

Ce tableau met également en évidence:

- L'effet de continentalité, qui se traduit par un affaiblissement progressif de la pluviométrie avec la latitude; la pluviométrie moyenne passe de 145 mm à Agadez au sud du massif, à 53 mm à Iférouane au nord. La valeur d'El Méki, situé un degré au nord d'Agadez, et seulement deux degrés au sud d'Iférouane, apparaît relativement préservée, vraisemblablement en raison de l'effet d'altitude imposé par le relief du Todgha (1850 m) tout proche.

- La position d'abri de la partie orientale de l'Aïr qui est soulignée par la faible valeur moyenne enregistrée à Tabelot (53 mm), par rapport à celle d'El Méki (130 mm) sensiblement à la même latitude à l'ouest. Ce phénomène longitudinal fait également ressortir l'origine occidentale des masses d'air pluvio-gènes.

- Le caractère de plus en plus aléatoire de la pluviosité, vers le nord et l'est, souligné par la valeur croissante des écarts-type.

- L'écart relatif accru des valeurs caractéristiques des distributions dans ces mêmes directions septentrionales et orientales.

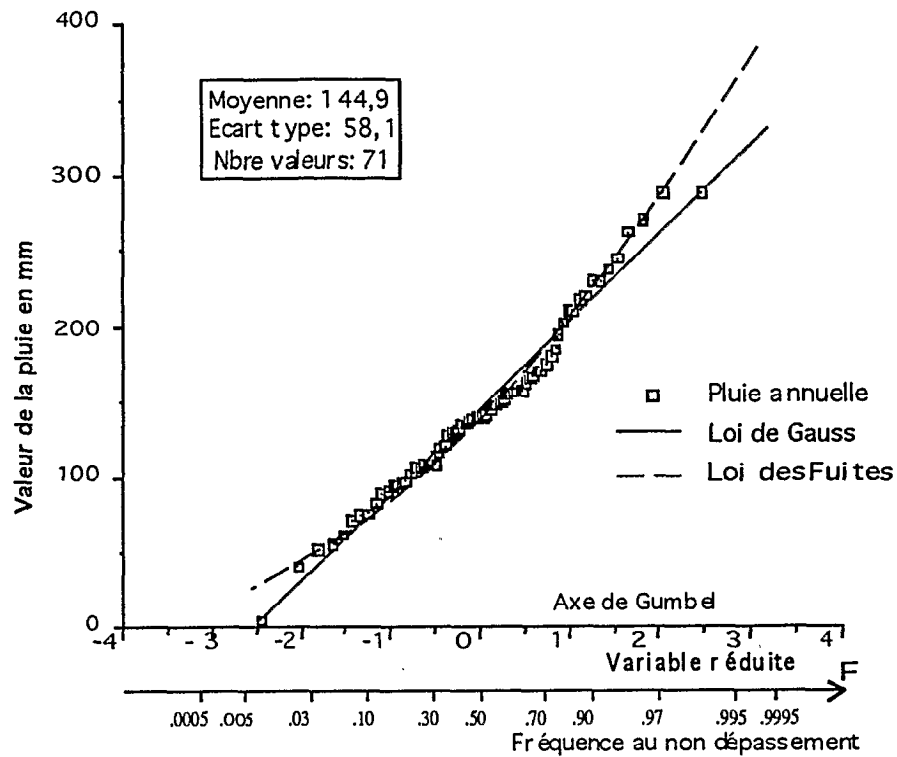


Fig. 2-A.24 Distributions statistiques des pluies annuelles d'Agadez

Remarque:

Dans le détail le phénomène apparaît plus sensible dans le sens ouest-est que dans le sens nord-sud. Car si la pluie décennale sèche passe de 51 % de la valeur médiane à Agadez, à 44 % à El Méki au niveau des premiers contreforts du massif, elle évolue peu ensuite puisqu'à Iférouane où elle est encore de 43 %. Par contre à Tabelot la décennale sèche ne représente que le tiers de la pluie médiane.

Aucun poste d'altitude de longue durée n'existe dans l'Aïr; néanmoins à l'occasion de l'étude des bassins versants de Tabelot Timia ou Iférouane, les valeurs pluviométriques des têtes de bassins (à des altitudes comprises entre 1500 et 2000 mètres) ont pu être comparées à celles des exutoires situés 500 à 700 mètres plus bas. L'effet d'altitude perceptible partout est naturellement plus sensible au sud qu'au nord du massif en 1980 (tab. 2-A.20).

Tab. 2-A.20 Altitude et pluviométrie sur le massif de l'Aïr en 1980

TABELOT S 2		TIMIA BV 2		IFEROUANE S 2	
P 4 (1600 m)	149 mm	P 3 (1500 m)	171 mm	P 1 (1600 m)	157 mm
P 14 (1000 m)	28 mm	P 5 (1100 m)	123 mm	P 19 (800 m)	94 mm

Suivant les grandes tendances "excédentaire et déficitaire" définies en III-2, une étude statistique a été menée sur chaque séquence qui met encore mieux en valeur la sécheresse.

– La Séquence "excédentaire" ne prend en compte que les pluies avant sécheresse:

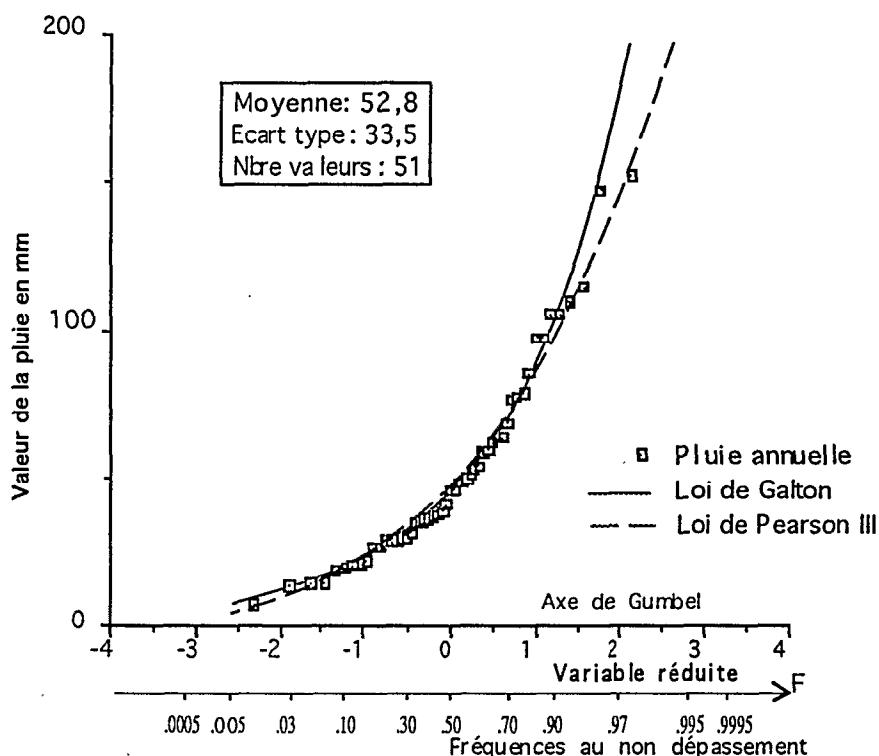


Fig. 2-A.25 Distributions statistiques des pluies annuelles d'Iférouane

Les fréquences théoriques caractéristiques des meilleures adéquations, dont on trouve les illustrations en annexes 2-A.III,4,5,6 sont proposées par le tableau 2-A.21.

Outre la valeur sensiblement plus élevée de la moyenne, par rapport à la période "normale" définie dans le tableau précédent, l'étude de cette séquence met en valeur:

- un effet d'altitude à El Méki qui n'était pas jusqu'ici perceptible,
- un amoindrissement de la dispersion, traduit par une réduction de l'écart type, en

Tableau 2-A.21 Distributions statistiques des pluies excédentaires de l'Aïr

POSTES/FREQUENCES	AGADEZ	EL MEKI	IFEROUANE
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	<u>Fuites</u>	<u>Gauss</u>	<u>Pearson II</u>
Suivant tests et ajust. graph.	Pearson III		Gumbel
Moyenne	169,9	186,6	63
Ecart-type	55	39,9	35,4
Période observée	22-64	50-63	40-69
f= 0,05 (vingtenale sèche)	87,7	(123)	18,3
f= 0,10 (décennale sèche)	103	137	24,4
f= 0,50 (un an sur deux)	165	187	56,8
f= 0,90 (décennale humide)	243	236	110
f= 0,95 (vingtenale humide)	267	(250)	129

valeur relative à Agadez et Iférouane, en valeur absolue à El Méki (dont la valeur relative, qui passe aussi de 50% de la moyenne à environ 20%, souligne un phénomène régulateur local, dont l'attribution à l'altitude, devrait pouvoir être confirmée par les isotopes).

- La séquence "sèche" récente; tableau 2-A.22 , et annexes 2-A.III,4,5,6:

Tab. 2-A.22 Distributions statistiques des pluies déficitaires de l'Aïr

POSTES/FREQUENCES	AGADEV	EL MEKI	TABELOT	IFEROUANE
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	Gauss	Gauss	Gumbel	Galton
Suivant tests et ajust. graph.			Pearson III	Pearson III
Moyenne	109	94	52,9	38,2
Ecart-type	40	34	35,4	23,7
Période observée	65-93	64-85	68-89	70-90
f= 0,05 (vingtenale sèche)	42,7	39,4	9,1	11,4
f= 0,10 (décennale sèche)	57,3	51,5	15,5	14,4
f= 0,50 (un an sur deux)	109	94,1	47,1	32,1
f= 0,90 (décennale humide)	160	137	96,1	69,8
f= 0,95 (vingtenale humide)	175	149	115	86,9

Les valeurs caractéristiques de la période sèche récente montrent un affaiblissement à tous les niveaux de fréquences pour tous les postes:

La moyenne baisse de 36% à Agadez, 50% à El Méki. Relativement au degré d'aridité du milieu Nord-Aïr, l'affaiblissement enregistré à Iférouane (40%) apparaît moindre. Il semble donc que ce soit les secteurs habituellement les plus arrosés du massif qui aient été les plus soumis aux effets de la sécheresse. D'autre part, la dispersion représentée par l'écart-type est en nette progression surtout à l'Est (67% à Tabelot) et au Nord (62% à Iférouane) où les conditions de pluviosité sont les plus défavorables.

La mise en relation des valeurs statistiques des périodes considérées comme "normales" et "déficitaires" permet de souligner la constance relative de la distribution statistique aux deux extrémités nord et sud du massif:

A Agadez, comme à Iférouane, le rapport de la pluie décennale sèche à la pluie médiane reste à peu près le même; seule la station d'El Méki voit ce rapport augmenter sensiblement de 44 à 55 %. Ce fait confirme que cette station, située au pied des premiers reliefs notables du massif, verrait la distribution de ses pluies s'élargir en raison de la sécheresse, l'effet orographique étant dans ces conditions atténué.

La période d'observation de Tabelot, qui ne comprend que la séquence sèche, permet néanmoins de montrer que les conditions de pluviosité à l'est du massif, qu'il s'agisse des quantités ou de leur distribution, sont les plus sévères.

b) Répartition des pluies annuelles médianes et décennales:

En absence d'un nombre suffisant de postes de longue durée, le tracé des isohyètes ne peut être envisagé qu'à partir des données issues des différentes études réalisées par

l'ORSTOM. Dès 1959-1960 Lefèvre, propose un premier tracé d'isohyètes sur l'Aïr, tenant compte des quelques postes de longue durée existants, et d'une vingtaine d'implantations réalisées dans le cadre de son étude sur les grands écoulements du massif. La validité de ces postes n'excèdera pas, pour la plupart, les deux années de l'étude; ces derniers n'en constituent pas moins une donnée unique, et essentielle encore aujourd'hui, de par leur couverture. Ultérieurement, entre 1976 et 1981, dans le cadre d'études sur les bassins versants de Tabelot, Timia et Iférouane, de nouvelles données seront acquises sur quelques uns de ces anciens postes.

La meilleure référence en matière de pluies annuelles reste celle du bassin du kori Téloua (principal émissaire sud du massif) dont l'observation se poursuivra sans interruption de 1976 à 1990, et qui permettra d'obtenir les fréquences de référence des pluies pour la zone "sud-Aïr". L'annexe 2-A.III,7 présente les pluies annuelles des dix postes du Téloua, observés régulièrement durant la quinzaine d'années en question, et leur distribution statistique. Les valeurs des fréquences médianes et décennales (en mm), qui retiennent plus particulièrement notre attention, sont extraites de cette annexe: tableau 2-A.23

Tab. 2-A.23 Fréquences caractéristiques des pluies aux postes du Téloua

Postes	P 1	P 20	P 22	P 24	P 26	P 28	P 29	P 32	P 33	P 34
f = 0,10	35	41	46	37	37	23	19	35	52	63
f = 0,50	94	124	110	76	96	79	78	100	118	130
f = 0,90	181	254	199	116	198	166	136	197	184	197

Utilisant la technique des polygones de Thiessen, affectant à chaque pluviomètre une aire d'influence tenant compte des postes environnants, un calcul de pluie moyenne sur le bassin a été effectué pour chaque année. Le traitement statistique des dix huit valeurs moyennes obtenues, tenant compte des pluies moyennes des années 1959, 1960 (Lefèvre) et 1964 (Roche) conduit aux fréquences de précipitations moyennes sur le bassin du tableau 2-A.24:

Tab. 2-A.24 fréquences caractéristiques des pluies moyennes du Téloua

FREQUENCES	0,95	0,90	0,50	0,10
Pluie an./18 ans (mm)	20	45	108	160

La relation acceptable qui lie sur 18 années (à part pour l'année 1977), les pluies moyennes du bassin du Téloua et les pluies relevées à Agadez, proche de la première bissectrice, garantit la représentativité sud-Aïr des valeurs du Téloua (Tab. 2-A.25, fig.2-A.26)

Tab. 2-A.25 Pluies moyennes (mm) du Téloua et d'Agadez de 1959 à 1990

An	59	60	64	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Pm T	170	110	100	80	145	113	100	169	119	140	70	15	76	115	56	176	99	88
P Az	172	147	129	107	71	100	108	156	127	138	94	4	61	97	51	137	131	90

Les précipitations annuelles moyennes des bassins de Tabelot, situés en bordure sud-est du massif des Bagzanes (Téloues, Nabarou, Akrereb), ont été mises en relation avec les précipitations moyennes du bassin du Téloua pour leurs années communes 1976-1980.

L'annexe 2-A.III,8 présente les liaisons qui sont linéaires et de bonne qualité, particulièrement celle avec Nabarou. Les fréquences caractéristiques des pluies des bassins de Tabelot (Tableau 2-A.26) sont déduites de ces liaisons.

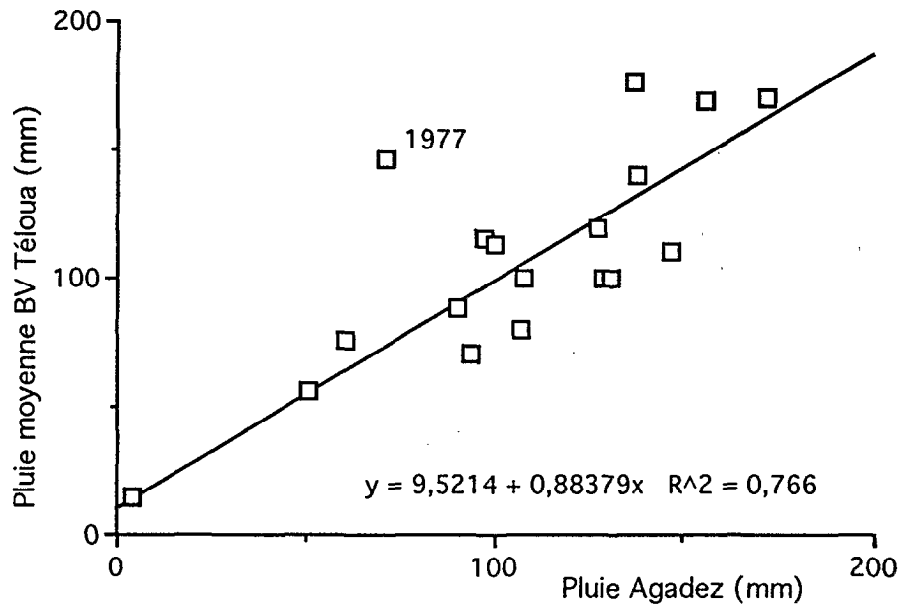


Fig. 2-A.26 Relation pluie moy. sur le Téloua, pluie annuelle à Agadez

Les valeurs décennales sont proposées, sous toute réserve, car leur extrapolation dans ce milieu reste hasardeuse, et particulièrement sur la partie Est du massif, dont il a été montré que les distributions correspondaient souvent à des lois de valeurs extrêmes.

Tab. 2-A.26 Fréquences caractéristiques des pluies moy. des BV de Tabelot

FREQUENCES au dépassement	0,90	0,50	0,10
Pluie TELOUES (mm)	0	50	100
Pluie NABAROU (mm)	0	60	120
Pluie AKREREB (mm)	0	35	90

Les fréquences décennales nulles, plus encore que la faiblesse des fréquences médianes soulignent le caractère aride de la partie Est du massif, dont les reliefs, pourtant parmi les plus importants de l'Aïr (Indoukal in Taghès, 2022 m), ne parviennent plus à stimuler les masses d'air, dont les potentialités pluviogènes se sont épuisées au franchissement des premiers contreforts abordés par le sud-ouest.

Pour les bassins de Timia, situés au centre de l'Aïr, la question s'est posée du choix d'une relation avec les pluies du Téloua au sud, ou avec celles d'Iférouane au nord, dont la longue série d'observations aurait aussi pu être prise comme référence.

La bonne relation qui lie les valeurs de pluies moyennes du bassin Timia 1 à celles du Téloua, a conduit au choix d'une solution "sud-Aïr". De caractère légèrement exponentiel (fig. 2-A.27) la relation a permis, comme dans le cas précédent, l'obtention des valeurs de fréquences médianes et décennales pour les pluies moyennes "centre-Aïr" (Tableau 2-A.27)

Tab. 2-A.27 fréquences caractéristiques des pluies moyennes du BV de Timia 1

FREQUENCES au dépassement	0,90	0,50	0,10
Pluie TIMIA 1 (mm)	(76)	98	(124)

Remarque: Dans le cas du bassin Timia 2, situé plus à l'Est et ne comportant pas de secteur d'altitude comme le premier, la relation est nettement moins convaincante; la valeur médiane apparaît beaucoup plus faible, de l'ordre de 70 mm.

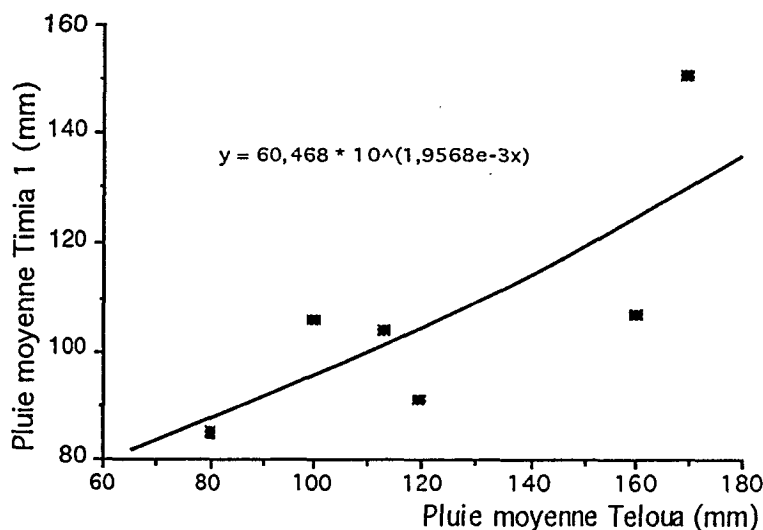


Fig. 2-A.27 Relation pluie moyenne BV Timia"1", BV Téloua

Les précipitations moyennes des bassins d'Iférouane, essentiellement constitués d'Iberkoum (S 2) et de Tamgak (S 1), ont été rapprochées (sur 6 ans) des pluies d'Iférouane, dont la connaissance depuis 1940 offre une bonne potentialité statistique.

Les trois relations présentées par l'annexe 2-A.III,9 (BV d'Iférouane = somme de tous les bassins) de type exponentiel, proches les unes des autres, mettent en évidence une influence toute relative de l'altitude à cette latitude. Les valeurs de fréquences caractéristiques du tableau 2-A.28 sont tirées de ces relations:

Tab. 2-A.28 Fréquences caractéristiques des pluies moy. des BV d'Iférouane

FREQUENCES au dépassement	0,90	0,50	0,10
Adoubdoub (TAMGAK S1)	25	37	75
Seloufiet (IBERKOUM S2)	23	32	61
BV IFEROUANE	22	33	34

c) Tracé des isohyètes:

Tenant compte de toutes ces données de pluies moyennes, des valeurs isolées des pluviomètres totalisateurs rapprochés des valeurs de fréquences caractéristiques locales, et de la position des principaux reliefs, un tracé des isohyètes médianes, décennales sèches, et décennales humides est proposé pour l'ensemble de l'Aïr (Annexes 2-A.III,10,11,12)

Ce tracé est assez proche de celui de R. Lefevre en 1960. Il montre en particulier l'origine sud-ouest des pluies. Les premiers reliefs importants centre-sud du massif (région Elméki-Aoudéras) concentrent les plus fortes précipitations. Au delà, vers le nord et surtout vers l'est, les précipitations diminuent rapidement, malgré la présence de reliefs plus importants qui semblent de moins en moins aptes à stimuler la potentialité des masses d'air.

Remarque: Dans la zone Nord-Aïr, le tracé des isohyètes rendu délicat par la faiblesse des pluies (liée à la latitude, à la proximité du Ténéré) et du nombre de postes, a été largement facilité par les données 1989 et 1990 de la trentaine de pluviomètres du réseau de la RNNAT (Réserve Naturelle Nationale de l'Aïr et du Ténéré) aimablement communiqué par F. Giazzi.

4) Les pluies mensuelles:

a) La répartition des pluies mensuelles:

La répartition mensuelle des pluies, et son évolution en fonction des séquences "humide" et "sèche" dégagées précédemment, a été étudiée à partir des données des postes d'Agadez et d'Iférouane (Tableaux 2-A.29 & 30; histogrammes des figures 2-A.28 et 29).

Tab. 2-A.29 Répartition des pluies moyennes mensuelles à Agadez (mm)

PERIODE	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec
Moy 22-93	0,08	0,04	0,13	1,39	5,66	9,33	41,6	72,9	12,9	0,28	0	0
Moy 22-64	0,14	0,03	0,01	0,91	5,00	8,27	45,2	88,8	16,1	0,38	0,00	0,02
Moy 65-93	0	0,05	0,30	2,05	6,54	10,7	34,9	46,3	7,77	0,11	0	0
Max mens	3,5	1,5	5,5	50,2	71,9	83,9	120	168	79,2	4,6	0,1	0,9

La potentialité d'apparition des pluies existe toute l'année, mais d'octobre à mars elle est très faible, et les quantités sont insignifiantes. En avril-mai les précipitations sont encore généralement peu importantes, bien que certaines années un ou deux évènements puissent représenter une part non négligeable de la pluie annuelle.

La véritable saison des pluies dure quatre mois, de juin à septembre. Mais le cœur juillet et surtout août, concentre près de 90 % du total moyen précipité à Agadez; 70 % seulement à Iférouane.

Les histogrammes mettent bien en valeur les disparités entre les deux stations:

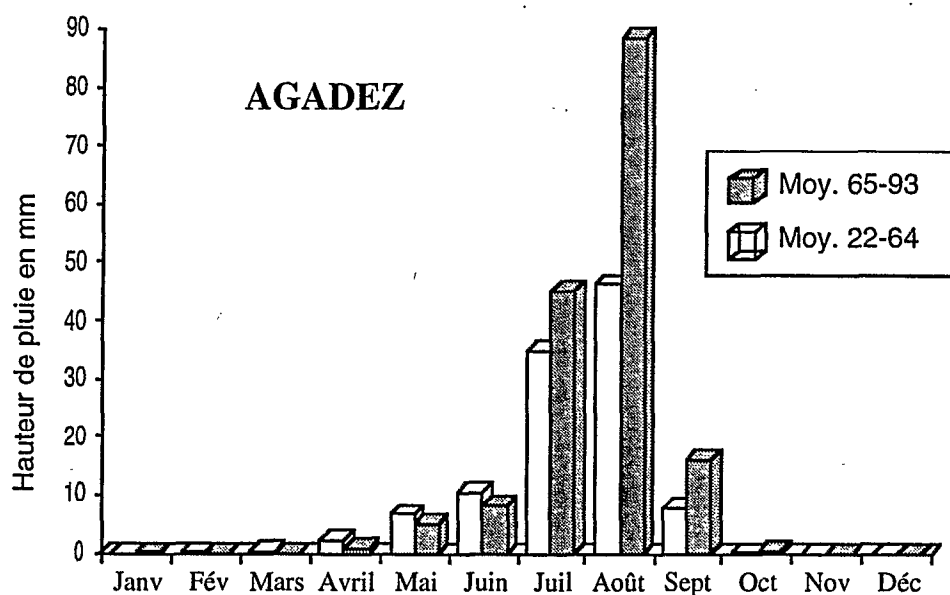


Fig. 2-A.28 Pluviométrie mensuelle d'Agadez: périodes sèche et humide

La saison des pluies est très concentrée sur juillet et août à Agadez, mieux répartie à Iférouane; une explication peut être avancée concernant cette différence:

Tab. 2-A.30 Répartition des pluies moyennes mensuelles à Iférouane (mm)

PERIODE	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec
Moy 40-93	0,09	0	0,07	2,18	3,30	5,93	11,7	23,3	5,93	0,26	0,05	0,04
Moy 40-69	0,15	0	0,11	3,55	4,43	4,71	13,7	28,7	7,17	0,43	0,08	0,06
Moy 70-93	0	0	0	0	1,64	8,29	9,04	15,6	4,25	0	0	0
Max mens	3,9	0	3,2	65,5	47,5	52,6	61,5	91,3	27,8	9,6	2,4	1,8

A Agadez l'effet orographique est inexistant, et l'effet radiatif relativement limité du fait du fort albédo lié aux surfaces claires des sables de la dépression périphérique de l'Air. En mai et juin la trace au sol du F.I.T. (isotherme 39°) est déjà sur le massif, mais l'épaisseur du "coin humide" de la mousson est trop faible, et les facteurs d'instabilité trop peu actifs pour générer des ascendances.

A Iférouane, bien que le "coin de mousson" soit aussi très faible en mai et juin, il se trouve d'emblée soumis à l'effet orographique et aux fortes instabilités d'origine radiative qui règnent au cœur du massif à la fin de la saison sèche; les potentialités de la masse d'air humide, même faibles, sont forcées.

Le mois d'août en perdant, à Agadez comme à Iférouane, près de 50 % de son total précipité, concentre la plus grande partie du déficit. En valeur relative, septembre perd également 40 à 50 % de sa pluie, mais le phénomène a peu d'incidence, car intervenant sur des totaux faibles.

Juillet apparaît moins touché que les mois suivants avec une baisse relative de 20 à 30 %

En mai-juin le phénomène est surprenant dans la mesure où la sécheresse se traduit aux deux stations par une augmentation sensible de la pluviosité; de 15 à 20 % à Agadez, et jusqu'à 80 % à Iférouane, mais en juin seulement.

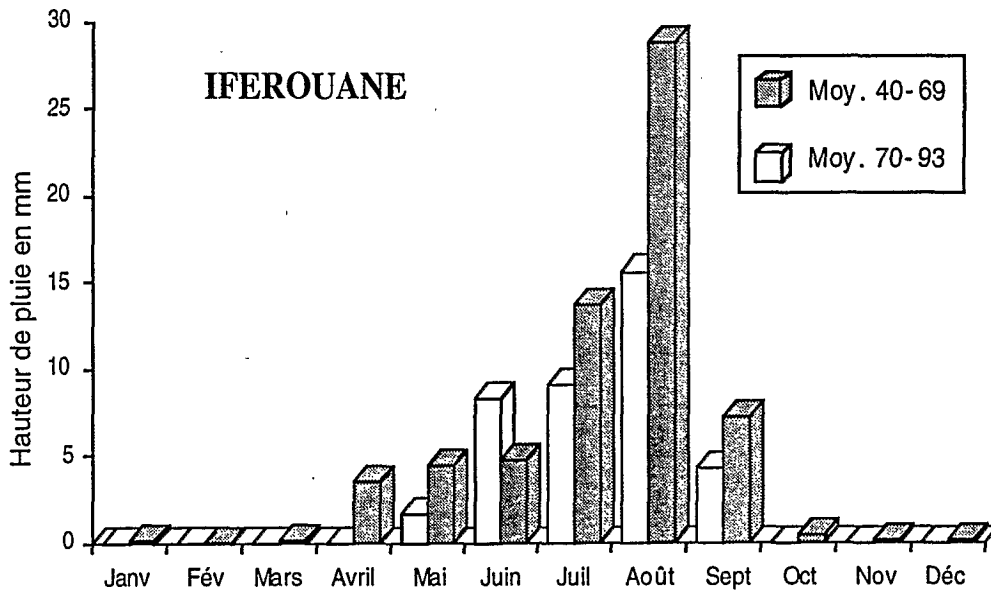


Fig. 2-A.29 Pluies moyennes mensuelles d'Iférouane: périodes humide et sèche

L'explication doit vraisemblablement être recherchée dans la différence de dynamique du coin de mousson qui se traduit par une épaisseur variable de ce dernier. Les images satellites (Météosat) montrent qu'entre deux années de pluviosité différente (Gallaire et al, 1994) la trace du FIT au sol n'est pas vraiment significative, et que seule l'épaisseur du coin de mousson peut justifier la différence d'abondance de la saison des pluies, en liaison avec les conditions radiatives locales.

Ainsi les masses d'air humide qui s'installent sur la région d'Agadez durant la dernière période sèche (65-93) sont vraisemblablement moins épaisses, mais elles se trouvent soumises à un effet radiatif supérieur qui force les instabilités.

A Iférouane le phénomène est encore plus net en juin en raison d'effets radiatifs très vigoureux à cette période de l'année. L'important déficit d'avril-mai n'est lié qu'à l'extrême faiblesse des masses d'air pluvio-gènes sur le massif, à cette époque de l'année, durant la période sèche.

b) Distribution statistique des pluies mensuelles:

Le traitement statistique des pluies mensuelles d'hivernage permet de proposer pour chaque mois aux deux stations des valeurs correspondant aux principales fréquences de retour. Les tracés graphiques des lois retenues pour les distributions mensuelles d'Agadez et Iférouane sont, comme pour les pluies annuelles, proposés en annexes 2-A.III, 13 à 16.

Tab. 2-A.31 Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Agadez

MOIS/FREQUENCES	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMB
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	Galton	Gumbel	Fuites	Pearson III
Suivant tests et ajust. graph.	Goodrich	Fuites	Gumbel	Fuites
Moyenne	9,37	41,6	72,9	12,9
Ecart-type	13,47	24,34	40,5	15,7
Taille échantillon	71	71	72	72
f= 0,01 (centenale sèche)	0	0	4,69	0
f= 0,02 (cinquantenale sèche)	0	3,1	8,52	0
f= 0,05 (vingtenale sèche)	0	8,42	16	0
f= 0,10 (décennale sèche)	0,45	13,7	24,4	0,08
f= 0,50 (un an sur deux)	4,5	37,6	66,8	8,04
f= 0,90 (décennale humide)	20	75,2	129	32,3
f= 0,95 (vingtenale humide)	30	89,5	151	43,1
f= 0,98 (cinquantenale humid)	46	108	176	57,5
f= 0,99 (centenale humide)	61	122	195	68,5

Les tableaux 2-A.31 & 32 présentent les valeurs de fréquences de retour caractéristiques

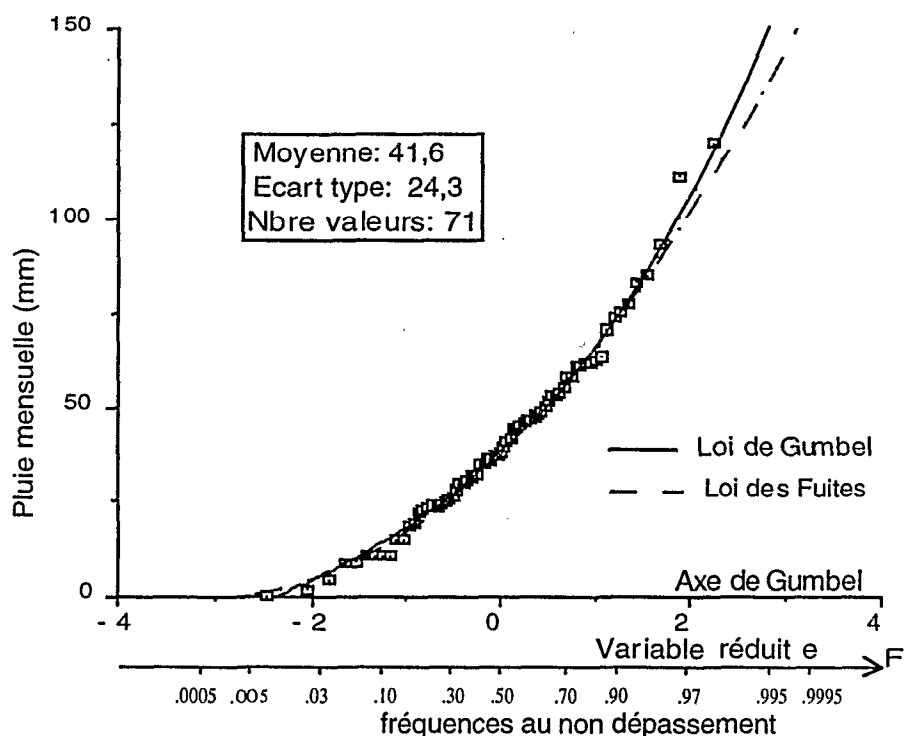


Fig. 2-A.30 Distribution statistique des pluies de juillet à Agadez

La variabilité interannuelle de la distribution des pluies mensuelles est naturellement soulignée par l'accroissement des écart-types dès que l'on s'écarte du cœur de l'hivernage:

En juin et septembre à Agadez l'écart type est supérieur à la moyenne; à Iférouane la dispersion des valeurs mensuelles est encore plus importante, puisque l'écart type apparaît supérieur ou égal à la moyenne au cœur même de l'hivernage.

Les courbes de répartition de juillet à Iférouane ont une allure beaucoup plus "tassée" qu'à Agadez (fig. 2-A.31), soulignant la dissymétrie de la distribution des précipitations à ce poste.

La faiblesse de la saison des pluies est soulignée par le fait qu'à Agadez la pluviométrie des mois encadrants, juin et septembre, soit nulle une année sur dix. A Iférouane le phénomène est encore plus restrictif, puisque cette valeur est atteinte un an sur deux pour ces mêmes mois.

Tab. 2-A.32 Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Iférouane

MOIS/FREQUENCES	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMB
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	Fuites	Galton	Pearson	III Fuites
Suivant tests et ajust. graph.	Goodrich	Pearson III	Fuites	Pearson III
Moyenne	6,2	12,2	24,3	6,2
Ecart-type	11,2	14	22	7,8
Taille échantillon	47	47	47	47
f= 0,02 (cinquantenale sèche)	(0)	(0)	(0)	(0)
f= 0,05 (vingtenale sèche)	0	0,16	0,81	0
f= 0,10 (décennale sèche)	0	0,74	2,41	0
f= 0,50 (un an sur deux)	1,38	6,3	17,47	3,39
f= 0,90 (décennale humide)	19	29,7	55,2	16,9
f= 0,95 (vingtenale humide)	26	45,1	71	22
f= 0,98 (cinquantenale humid)	(36)	(71,9)	(92)	(29)

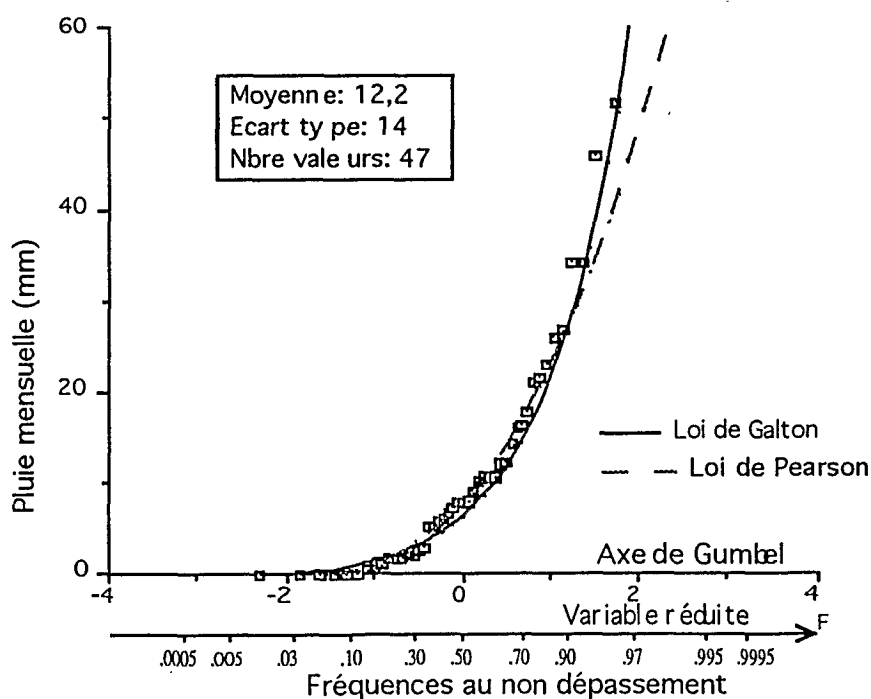


Fig. 2-A.31 Distributions statistiques des pluies de juillet à Iférouane

Un traitement statistique des pluies mensuelles pour la période récente déficitaire a été mené, à titre de comparaison avec la période précédente, pour Agadez (Tableau 2-A.33).

Tab.2-A.33 Distributions des pluies mensuelles (déficitaires) d'Agadez

MOIS/FREQUENCES	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMB
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	Pearson III	Gauss	Gumbel	Galton
Suivant tests et ajust. graph.	Galton	Fuites	Fuites	Pearson III
Moyenne	10,66	34,88	46,28	7,77
Ecart-type	12,98	20,04	26,05	9,51
Taille échantillon	29	29	29	29
f= 0,02 (cinquantennale sèche)	(0)	(0)	(5,1)	(0)
f= 0,05 (vingtennale sèche)	0	2,5	10,8	0
f= 0,10 (décennale sèche)	0	9,65	16,4	0,3
f= 0,50 (un an sur deux)	6,66	34,9	42	3,9
f= 0,90 (décennale humide)	26,7	60,1	82,2	17,4
f= 0,95 (vingtennale humide)	35,5	67,3	97,5	25,8
f= 0,98 (cinquantennale humid)	(47,3)	(75,3)	(117)	(40)

Les valeurs de ce tableau confirment les observations faites à partir des histogrammes: Les valeurs des fréquences d'août et de septembre sont les plus affectées par le phénomène de sécheresse, celles de juillet le sont peu, celles de juin apparaissent même excédentaires.

Remarques:

La représentation des lois théoriques fait apparaître, à Agadez comme à Iférouane (An.2-A.III,13,14,15,16), des valeurs de probabilité non nulles pour des valeurs nulles de pluie; en particulier pour les mois encadrant le cœur de la saison des pluies, Juin et Septembre; montrant qu'il aurait été nécessaire d'introduire un bornage pour ces mois.

A Iférouane l'apparition d'occurrences nulles, au cœur même de l'hivernage, souligne l'affaiblissement et l'irrégularité croissante des précipitations mensuelles à cette latitude.

5) Les pluies journalières:

a) répartition des jours de pluie:

Le nombre de jours de pluie a été relevé mensuellement aux postes d'Agadez et d'Iférouane durant les deux périodes "normale" et "sèche"; tableaux 2-A.34 & 35:

Tab. 2-A.34 Nombre moyen mensuel de jours de pluie à AGADEZ

Période	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec
22-64	0,11	0,02	0,05	0,19	1,30	2,33	6,28	10,7	2,79	0,27	0,02	0,05
65-93	0	0,03	0,35	0,38	1,41	2,59	6,55	8,28	2,38	0,21	0	0

Le nombre moyen de jours de pluie est faible à Agadez et évolue peu entre la période dite "normale" (1922-1964 = 24,1 j) et la période dite "sèche" récente (1965-1993 = 22,2 j).

Tab. 2-A.35 Nombre moyen mensuel de jours de pluie à IFEROUANE

Période	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	No	Dec
40-69	0,13	0	0,10	0,23	0,73	1,23	2,87	5,10	1,77	0,13	0,03	0,03
70-93	0	0	0	0	0,82	2,36	3,09	4,09	0,82	0	0	0

A Iférouane le nombre de jours de pluie est deux fois plus faible, mais il varie aussi peu entre la séquence "normale" (12,4 j) et la séquence "sèche" (11,2 j).

La figure 2-A.32 présente sous forme d'histogramme la répartition mensuelle du nombre de jours de pluie à Agadez pour les deux périodes définies.

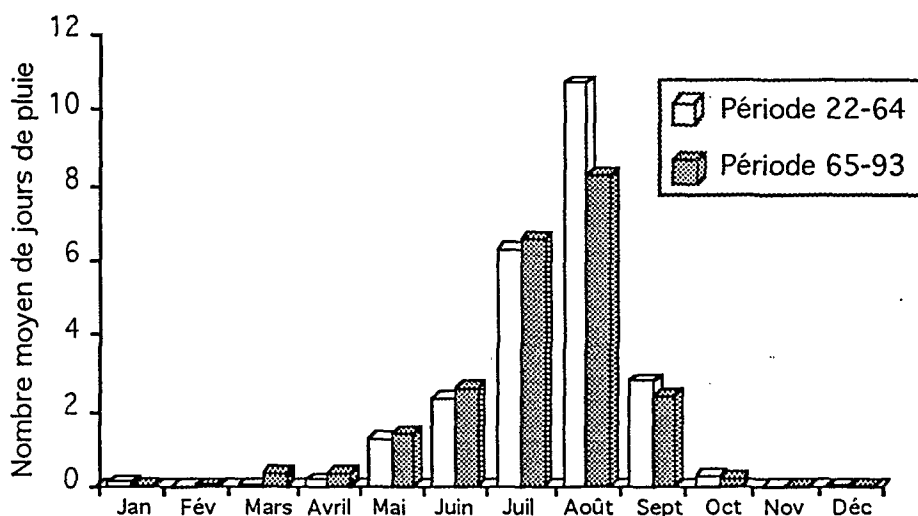


Fig. 2-A.32 Nombre moyen mensuel de jours de pluie à Agadez

La répartition du nombre de jours de pluie est assez conforme à celle des valeurs annuelles précipitées; juillet et août totalisent les trois quarts des jours de pluie de l'année, avec un sensible avantage à août. Juin et septembre regroupent, à part égale, les deux tiers du quart restant.

La comparaison des deux périodes montre que la sécheresse ne s'accompagne pas d'une réduction notable du nombre de jours de pluie, sauf en août dans une proportion d'un quart, et en septembre dans une moindre mesure. La comparaison de l'histogramme du nombre mensuel des jours de pluie, et de celui des valeurs de la pluie mensuelle, permet d'estimer l'évolution de la quantité moyenne de pluie par évènement entre les deux périodes:

En début de saison des pluies (mai-juin) la quantité précipitée de la période sèche augmente légèrement comme le nombre de jours de pluie. Il est donc vraisemblable qu'au cours de cette période les averses aient eu la même importance qu'au cours de la période précédente; à l'inverse des résultats de l'Etude des Pluies par SATellite (EPSAT) de la bande sahélienne au sud (Lebel et al, 1991).

En juillet le nombre d'averses de la période récente est toujours légèrement supérieur à celui de la période précédente, alors que la pluviométrie diminue d'environ 20 %. La quantité précipitée à l'évènement de ce mois marque donc un premier recul d'environ 25 %.

En Août, pour la même période sèche, le nombre de jours de pluie diminue d'un quart; mais comme dans le même temps les quantités précipitées s'effondrent de moitié, le bilan par évènement apparait donc toujours en diminution, d'environ 30 %, par rapport la quantité moyenne précipitée.

En fin de saison (septembre), alors que la quantité précipitée de la séquence sèche diminue de moitié, le nombre de jours de pluie reste à peu près le même; d'où une chute très sensible de la quantité précipitée par évènement.

b) Distribution quantitative des pluies journalières:

En 1960, R. Lefèvre effectue un classement de toutes les pluies journalières connues à cette date, aux postes d'Agadez et Iférouane, par tranches de 10 mm (tab.2-A.36)

Tab. 2-A.36 Classement des pluies (mm) à Agadez et Iférouane avant 1960

Nbre Pluies, Moy / Classes	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
AGADEZ (32 ans)	586	121	36	24	4	1	2
Nbre moyen de pluies	18,3	3,8	1,1	0,75	0,12	0,03	0,06
IFEROUANE (19 ans)	232	21	9	1	1		
Nbre moyen de pluies	12,2	1,1	0,5	0,05	0,05		

Ce classement, qui est représentatif du phénomène journalier avant la sécheresse, montre l'importance, déjà, de la classe "0-10" mm dans la distribution des pluies; en particulier à Iférouane où 12 des 14 pluies (soit 90 %) appartiennent à cette classe, alors qu'à Agadez le rapport n'est que de 75 % (18 pluies sur 24).

La séquence sèche qui débute après 1965 et qui affecte peu le nombre de jours de pluie à Agadez (-2), comme à Iférouane (-1), voit l'importance de la première classe (0-10 mm) augmenter encore (Agadez, 84 %, Iférouane, 93 %). La baisse de la pluviosité constatée sur l'Aïr depuis la fin des années soixante, se traduit donc plus par une augmentation du nombre de pluies de faible importance que par une diminution du nombre d'évènements.

Interprétation:

Il est vraisemblable que l'existence des masses d'air relativement humides de la "mousson" sur le massif ne doit pas être remise en question (Fontaine et Pérard, 1986; Joseph et al, 1986,1992) les images Météosat infrarouges sont là pour le confirmer (Guillot et Carn, 1988). Mais il est probable que dans le contexte de sécheresse, l'épaisseur du "coin humide" soit beaucoup plus faible et que, par conséquent, les ascendances thermiques n'aient plus la possibilité d'entraîner en altitude, vers les températures de condensation, des volumes d'air humide aussi importants. Là encore les isotopes devraient permettre d'étayer cette hypothèse;

les pluies de cette période devant à priori, pour des raisons de quantité et de sous-saturation de l'environnement précipitant, présenter des valeurs isotopiques enrichies.

c) La pluie annuelle journalière;

C'est la plus forte pluie de l'année; elle commande généralement l'importance de la crue annuelle. Les valeurs des principales fréquences de pluies annuelles journalières obtenues statistiquement aux trois postes couvrant les deux séquences "humides" et "sèches" successives sont proposées dans les deux tableaux 2-A.37 et 38:

Tab. 2-A.37 Distributions des pluies journalières de l'Air (séquence humide)

POSTES/FREQUENCES	AGADEZ	EL MEKI	IFEROUANE
	1929 -1964	1950 -1963	1940 -1969
Période observée	Pearson III	Gumbel	Pearson III
DISTRIBUTION OPTIMALE			
Moyenne	35,3	39,1	17,9
Ecart-type	13,1	14,4	10,4
Taille échantillon	35	14	30
f= 0,02 (cinquantennale sèche)	(13,8)	(17,6)	(3,0)
f= 0,05 (vingtennale sèche)	16,8	20,5	4,7
f= 0,10 (décennale sèche)	19,9	23,4	6,5
f= 0,50 (un an sur deux)	33,7	36,4	16,1
f= 0,90 (décennale humide)	52,7	56,9	31,7
f= 0,95 (vingtennale humide)	59	64,7	37,4
f= 0,98 (cinquantennale humid)	(66,7)	(74,9)	(44,6)

Les annexes 2-A.III,17,18,19 proposent, pour les trois postes, la représentation graphique des distributions optimales, suivant les deux séquences déficitaires et excédentaires.

Tab. 2-A.38 Distributions des pluies journalières de l'Air (séquence sèche)

POSTES/FREQUENCES	AGADEZ	EL MEKI	IFEROUANE
	1965-1993	1964-1985	1970-1990
PERIODE OBSERVEE	Fuites	Gauss	Gumbel
DISTRIBUTION OPTIMALE			
Moyenne	25,5	23,4	12,2
Ecart-type	10,2	8,5	6,5
Taille échantillon	29	22	21
f= 0,05 (vingtennale sèche)	9,4	9,8	3,9
f= 0,10 (décennale sèche)	12,1	12,8	5,2
f= 0,50 (un an sur deux)	24,3	23,4	11,1
f= 0,90 (décennale humide)	40,6	34	20,5
f= 0,95 (vingtennale humid)	45,9	37	24,1

Comme pour les totaux annuels la baisse des valeurs journalières de la séquence sèche est importante (30 à 40 %), et concerne toute la gamme des fréquences à Agadez. C'est à Iférouane que la diminution est la moins sensible, il est vrai sur des valeurs moyennes faibles, alors qu'à El Méki la baisse des valeurs extrêmes apparaît aggravée.

d) Les pluies journalières à caractère exceptionnel:

Toujours dans le cadre de ses études hydrologiques sur l'Aïr Lefèvre (1960) effectuée un classement des plus fortes précipitations sur le massif:

Son investigation le conduit à sélectionner pour Agadez toutes les pluies supérieures à 20 mm; pour Iférouane il est contraint de descendre la barre à 10 mm, afin de pouvoir conserver pour le traitement statistique une taille d'échantillon suffisante.

Brunet Moret (1968) reprend et complète ce travail trois ans plus tard, dans le cadre de l'étude des averses exceptionnelles en Afrique de l'ouest.

Partant de ces résultats, il paraissait intéressant, à titre de comparaison, d'effectuer le même exercice sur les données récentes considérées comme déficitaires. L'évolution de la distribution des plus fortes pluies (respectant pour Agadez et Iférouane les seuils définis par R. Lefèvre) est présentée dans les tableaux 2-A.39 et 40.

Tab. 2-A.39 Distributions des plus fortes pluies à AGADEZ (mm)

Période / Fréquences	1922-1960	1966-1990
Distribution optimale	Gausso-Log	Gauss
Moyenne	38,1	28,3
Ecart-type	8,7	9,3
Nbre de valeurs	38	18
Pluie maximale période	65,6	49,8
Fréquence 0,50	37,9	28,3
Fréquence 0,90	58,6	39,9
Fréquence 0,95	68,3	(50)
Fréquence 0,98	83	-
Fréquence 0,99	95	-

L'observation de ces résultats montre que les plus fortes précipitations sont aussi concernées par la persistance de la sécheresse:

A Agadez, les valeurs de fréquences médiane et décennale, de la dernière période, chutent respectivement de 25 et 32 %.

A Iférouane l'évolution est plus limitée; la valeur de la fréquence médiane est presque stable (- de 5 %), si la baisse de la valeur décennale atteint 20 %.

La différence entre les deux stations est néanmoins suffisamment nette pour que l'on puisse conclure, encore une fois, et sur un aspect de la pluie apparemment moins soumis à l'effet de sécheresse du fait de son caractère exceptionnel, à un déficit plus marqué au sud des événements pluviométriques rares. A Agadez, la fréquence décennale humide de la période sèche ne représente guère plus que la médiane de la période précédente.

Le moindre écart existant entre la distribution des pluies annuelles journalières et celle des pluies à caractère exceptionnel, fait ressortir la faiblesse, dans ce milieu des événements d'importance .

Tab. 2-A.40 Distributions des plus fortes pluies à IFEROUANE (mm)

Période / Fréquences	1940-1960	1966-1990
Distribution optimale	Gausso-Log	Gumbel
Moyenne	19,4	18,1
Ecart-type	5,34	5,62
Nbre de valeurs	21	15
Pluie maximale période	47	29
Fréquence 0,50	18,1	17,1
Fréquence 0,90	30,5	24,3
Fréquence 0,95	37	(30)
Fréquence 0,98	46	-
Fréquence 0,99	54	-

6) Les intensités:

Seule la station météorologique d'Agadez présentait une série de données suffisamment longue et fiable pour permettre une étude statistique des intensités. Cette recherche sur les intensités initiée dans les années soixante par le CIEH (Y. Brunet-Moret, 1963, 1968) fut poursuivie durant la sécheresse par cet organisme (Lahaye, 1980)

a) Distribution des intensités en fonction de la durée de l'averse:

Elle est étudiée sur la première partie de la sécheresse (période 1966-1982) par le CIEH. La fréquence des intensités à Agadez est proposée par le tableau.2-A.41:

Les intensités évoluent rapidement, sur toute la gamme des fréquences, jusqu'à trente minutes, par la suite elles n'augmentent plus que faiblement. Si on considère que l'intensité de la pluie est l'un des facteurs premiers du ruissellement, un événement de 30 à 45 minutes semble donc constituer localement un optimum pour cet effet de surface.

Tab. 2-A.41 Intensités et durées de l'averse à Agadez (mm/h)

DUREE / FREQUENCE	5'	10'	15'	30'	45'	1 h	2 h
f = 0,05 (1 an sur 20)	17	21	23	30	33	34	35
f = 0,10 (1 an sur 10)	14	18	21	26	29	30	31
f = 0,20 (1 an sur 5)	12	16	17	22	25	25	26
f = 0,50 (1 an sur 2)	9	12	14	17	18	19	20

b) Morphologie des pluies:

La distribution de ces intensités moyennes souligne également le caractère bref orageux des précipitations dont les hyétogrammes, peu étendus dans le temps, présentent souvent, dès les premières minutes, de vifs élancements immédiatement suivis de périodes de trains, aux intensités faibles, de quelques minutes à quelques dizaines de minutes. L'annexe 2-A.III,20 présente quelques morphologies de pluies aux stations d'Azal et d'Iférouane (Tamgak).

Sur des périodes brèves, les intensités peuvent être très importantes, comme le montre la décomposition du hyétogramme de la pluie du 6 août 1959 à Razel, où le maximum atteint 200 mm/h durant 3 minutes (fig.2-A.33) et dont les intensités-durées représentent, pour cette année là, les valeurs maximales moyennes observées (Lefèvre, 1960), tableau 2-A.42:

Tab. 2-A.42 Intensités-durées de l'averse du 6/8/59 à Razel

Intensité moy. en:	5 minutes	10 minutes	15 minutes	30 minutes
de 16 h 40 à 16 h 45	168 mm/h			
de 16 h 37 à 16 h 47	132 mm/h			
de 16 h 37 à 16 h 52	108 mm/h			
de 16 h 35 à 17 h 05	63 mm/h			

Il apparait, d'autre part, que les intensités puissent, comme les quantités, bénéficier d'un effet orographique; tout au moins dans la partie sud du massif, où les masses d'air conservent une potentialité suffisante pour exprimer la différence (tableau 2-A.43)

Tab. 2-A.43 Intensités en fonction de l'altitude dans l'Air en 1959

POSTE et SITUATION	ALTITUDE de l'environnement	Intensité en 5mn (mm/h)
AGADEFZ, en dehors du massif	500 mètres	102
RAZEL, premiers reliefs encaissants du Téloua	600 à 800 mètres	168
EL MEKI, aux pieds du Todgha	800 à 1800 mètres	120

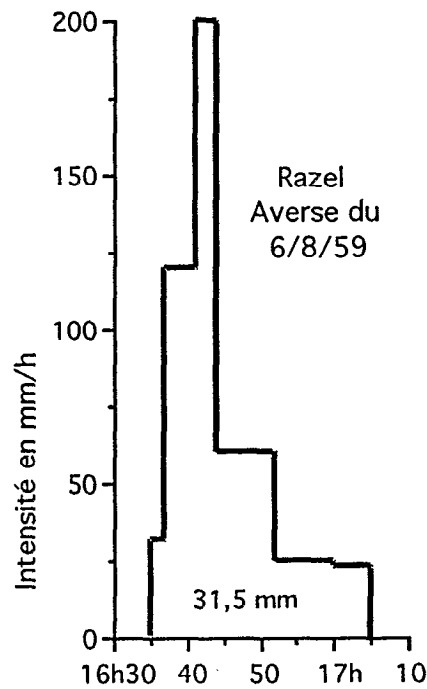


Fig. 2-A.33 Hyétoqramme de l'averse du 6 août 1959 à Razel

La reprise des 156 hyétoqrammes dépouillés pour les études ORSTOM entre 1976 et 1990 permet d'effectuer un certain nombre d'observations sur l'évènement pluie:

- A l'intérieur du massif (bassin d'Iférouane, de Timia, d'El Méki), les averses se produisent généralement dès le début de l'après midi, entre 13 et 15 heures, alors qu'en périphérie elles n'interviennent la plupart du temps qu'après 16 heures, en raison toujours d'effets orographique et radiatif sensiblement différents.

- Un petit nombre d'évènements surviennent de nuit ou au petit matin, lorsque certaines masses d'air, au faible potentiel en eau, ne peuvent être condensées qu'à la faveur du refroidissement nocturne.

- L'observation des valeurs de postes de proximité, Pe10 et Pe12, situés à moins de 10km l'un de l'autre sur les bassins d'Iférouane, montre la variabilité spatiale d'intensité et de quantité de la pluie à l'évènement.

Cette irrégularité de la distribution des averses souligne le caractère orageux des précipitations, qu'une étude des intensités vient préciser.

c) Distribution des intensités:

Elle a été étudiée à partir de 156 pluies, d'une intensité supérieure à 10 mm/h, enregistrées dans l'Air par l'ORSTOM au cours de ses études entre 1976 et 1990. Les hyétoqrammes de ces évènements ont permis le calcul des intensités moyennes des principaux secteurs du massif pour différentes durées, jusqu'à trente minutes; cette dernière couvrant le plus souvent le corps de l'averse.

La tendance sud-Aïr est représentée par les enregistrements des postes du bassin du Téloua; 57 événements issus des stations d'Azél, Agassaghas, Azamella, Pe24, Aoudéras.

La tendance Est-Aïr est représentée par 33 enregistrements du poste de Tabelot; celle centre-Aïr par 22 enregistrements des bassins de Timia; enfin la tendance Nord-Aïr est extraite des 44 enregistrements des bassins d'Iférouane.

Les intensités moyennes diminuent logiquement avec le développement de l'événement dans tous les secteurs. Les tendances relevées pour les intensités sont conformes aux schémas déjà dégagés pour les autres caractères de la pluie (tableau 2-A.44)

– Les tendances "sud" et "centre" Aïr sont proches; les intensités moyennes sont les plus importantes à tous les stades de la précipitation. La diminution très sensible des intensités en fonction de l'allongement de la durée du phénomène (les valeurs calculées sur trente minutes ne représentent plus que le tiers de celles obtenues sur cinq minutes) met en évidence le caractère orageux de la pluie; les fortes intensités ne représentent qu'une partie limitée du corps de l'averse.

Tab.2-A.44 Distribution des intensités dans l'Aïr (mm/h)

SECTEUR / DUREE		5 mn	10 mn	15 mn	30 mn
Sud Aïr (57 évènements)	Moyenne	47	36	30	19
	Ecart type	36	28	24	17
	Maxi	162	162	137	108
Est Aïr (33 évènements)	Moyenne	32	24	18	11
	Ecart type	23	13	10	6
	Maxi	142	71	47	24
Centre Aïr (22 évènements)	Moyenne	49	38	28	17
	Ecart type	33	27	21	12
	Maxi	156	108	94	54
Nord Aïr (44 évènements)	Moyenne	34	30	24	17
	Ecart type	24	21	17	14
	Maxi	118	97	88	67
Global Aïr (156 évènements)	Moyenne	40	32	25	16
	Ecart type	29	24	20	14
	Maxi	162	162	137	108

La légère prééminence des intensités centre-Aïr sur les courtes durées (5 à 10 minutes) est à mettre sur le compte de l'effet de massif de la région de Timia (reliefs et faible albédo des masses basaltiques stimulant la dynamique d'ascendance et l'altitude de condensation).

– Les tendances "est et "nord" Aïr peuvent être, de même, rapprochées; tout au moins pour la durée la plus courte, où les intensités apparaissent environ 30% moins élevées que dans les régions "centre" et "sud" Aïr. Car ultérieurement, l'affaiblissement est beaucoup plus rapide dans le secteur "est" du massif que dans le secteur "nord", où encore une fois, il

semble bien que la diminution relativement limitée (50% entre 5 et 30 minutes) des intensités puisse être reliée à un effet de massif.

– L'écart type des intensités moyennes met en évidence la plus ou moins grande régularité de la forme des précipitations dans le massif. C'est au sud, là où les potentialités sont les plus fortes, que la dispersion est la plus importante. A l'est, là où les potentialités sont les plus faibles, la dispersion apparaît plus modérée; comme le montrent les écarts types enregistrés au poste de Tabelot pour lequel la sévérité de la proximité du Ténéré semble produire un effet régulateur.

CONCLUSION:

Ainsi donc, si le massif de l'Aïr semble, comme la plupart des reliefs sud-sahariens (Dubief, 1953; Guillot et Carn, 1988), pouvoir régénérer un certain nombre de masses d'air de mousson (dont la potentialité est très atténuée à cette latitude), il n'en apparaît pas moins très marqué par le phénomène de sécheresse qui est sensible dans le nord depuis maintenant trente ans. Ce sont les premiers reliefs au sud, habituellement les plus arrosés, puisqu'interceptant en premier les masses affaiblies de mousson, qui sont les plus touchés. C'est aussi dans cette région sud-Aïr que les écoulements, par voie de conséquence, seront aussi les plus diminués.

B_ LES BASSINS VERSANTS:

I. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE L'AÏR:

Le bombement dissymétrique du massif qui donne au versant ouest une plus grande importance, et l'origine sud-occidentale des masses d'air pluviogènes, expliquent l'importance du réseau de drainage dans ces directions.

1) Description:

Assez dense à l'intérieur, en partie sous l'influence du jeu de la tectonique, le réseau hydrographique a tendance à fusionner, en sortie du massif, à la faveur des dépressions qui se sont développées, par érosion différentielle, dans les formations gréseuses (grès d'Agadez) du Continental Intercalaire (C.I.). Cette série, qui comprend les grès du Téloua et ceux de Tchirezrines, est particulièrement apparente, au contact avec le socle, sur le versant sud-occidental de l'Aïr, et au niveau de la falaise de Tiguidit (cuesta) qui limite la dépression au sud-ouest à plusieurs dizaines de kilomètres du massif (An. 2-B.I,1)

– Le Torouf, qui draine la région sud, depuis le pied des Bagzanes, est dévié dans sa course vers le sud-ouest par la montée en puissance, dans cette direction, de la cuesta qui lui imprime une direction ouest, et bientôt nord-ouest. L'écoulement prend alors le nom

d'Irhazer oua'n (ou wan) Agadez, et reçoit en rive droite les koris Amdigra, Téloua, Tchirozérine. A la faveur de l'ensellement progressif du relief de la cuesta vers le nord, l'Irhazer suit à nouveau le pendage général des formations sédimentaires vers l'ouest, et reçoit le kori Salomi qui provient en droite ligne des premiers reliefs importants du sud du massif (Todgha).

– Venant du nord-est, le réseau de l'Anou Zagarène figure un schéma symétrique; recevant en rive gauche l'Anou Makarène qui dévale en droite ligne des massifs centraux de la région de Timia (Adrar Egalah). En amont l'Anou Zagarène est issu de la confluence, à la sortie du massif, de trois koris principaux provenant de la partie nord de l'Aïr:

. le Zilalet, dont la course E-W depuis les massifs centraux Goundaï et Agueraguer est infléchi à la sortie du massif (comme celle du Torouf au sud) vers le nord, par la dépression du Talak.

. le Rarous, qui vient des monts Tamgak,

. l'Amachegh dont les eaux sont originaires des derniers reliefs consécutifs du nord; Greboun, Tessiguidit.

2) Activités actuelle et passée:

Le réseau est actif par intermittence, dans son ensemble, à l'intérieur du massif (là où l'effet du relief, les pentes, les sols, sont favorables à l'expression des manifestations hydrologiques), à peu près chaque année, par séquences de quelques heures à quelques jours, pour des durées annuelles de moins en moins importantes du sud au nord, de l'ouest vers l'est:

Les périodes d'écoulement annuel des koris du sud, comme le Téloua, sont en moyenne de vingt à trente jours; alors que celles des koris du nord, comme le Tamgak, sont inférieures à dix jours, lorsqu'elles existent.

A la périphérie du massif la dégradation hydrologique est très forte en raison de la perméabilité des formations de couverture des cônes de déjection, et des pentes en sensible diminution (lorsque le jeu de contre-pente des dépressions périphériques n'existe pas!)

Les écoulements qui parviennent en bordure du massif sont donc soumis à de rapides infiltrations qui font de l'Aïr une zone endoréïque. L'Anou Zagarène, comme l'Irhazer oua'n (ou wan) Agadez, ne sont actuellement, comme l'Azaouk et le Dallol Bosso par la suite (fruits de leur confluence), que d'imposantes vallées sèches qui témoignent de l'importance passée, sous d'autres climats, du drainage de l'Aïr, et même d'une partie du Hoggar, vers le bassin du Niger et du Tchad (Tafassâset); Dubar, 1988; Durand, 1983; Gasse, 1990; Maley, 1981,82; Morel, 1981, 86; Rognon, 1976, 80, 81; Servant, 1974; Tehet, 1990 Les dernières séquences humides ayant pu rendre actif l'ensemble ou partie du réseau sub-désertique saharien se situant dans un passé proche à l'échelle géologique, entre 29000 et 20000 BP (Ghazalien) et tout récemment entre 7000 et 4000 BP.

II. SITUATION ET PERIODE D'OBSERVATION DES BASSINS ETUDIES:

A part quelques opérations ponctuelles, comme celle de la SOGETHA (Société de gestion et d'étude hydraulique agricole) sur le Talak-Zilalet, ou de la coopération suisse à Tamazalak dans les années 1980, les études hydrologiques de surface dans l'Aïr ont été menées, dans une large mesure par l'ORSTOM répondant, la plupart du temps, à la demande des ministères qui ont eu la responsabilité de la gestion de l'eau au Niger.

Initiée à la fin des années "60" par Lefèvre (1959-1960) et Roche (1964), la grande période d'étude des bassins versants de l'Aïr se situe dans la seconde partie des années 70 (Hœpffner et al, 1976-1981) à la suite des premières manifestations préoccupantes de la sécheresse (raréfaction des écoulements, baisse des nappes, assèchement des puits...).

Ultérieurement, les études se sont limitées, jusqu'en 1990, au bassin versant du Téloua, en raison de l'importance de ses écoulements pour l'alimentation en eau d'Agadez. La priorité fut d'abord (1981-1982) dans la protection de la ville contre ses crues; construction de digues dans le but de limiter les écoulements sur le bras gauche du Téloua, le plus proche de la ville. La conséquence catastrophique, sur la recharge de la nappe, de l'arrêt des écoulements sur cette partie du bassin conduisit, très rapidement, à un retour partiel en arrière (réouverture aux écoulements du bras gauche), et à la recherche des zones préférentielles d'infiltration (Billon et al, 1980, 1981; Ribstein et al, 1982; Bricquet et al 1983, 1984; Gallaire et al, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990).

Le tableau 2-B.I,2, en annexe, fait le point sur la situation et les périodes d'observation des différents bassins de l'Aïr. L'annexe 2-B.I,3 situe et schématise l'importance de la couverture du massif assurée par les différents bassins dont le plus important, le Zilalet, au centre du massif, en raison de son importance (5800 km²) et des investissements matériel et humain qui auraient été nécessaires à une étude exhaustive, n'a malheureusement produit que des données difficilement exploitables.

D'autres bassins, comme celui d'Amdigra au sud-ouest du massif de Tarouadji, ou de Tchirozérine à l'ouest du Téloua, n'ont été observés que trop peu de temps, ou de façon trop fragmentaire pour permettre une définition satisfaisante de leur comportement hydrologique. Ces données aussi éparées et fragmentaires qu'elles soient, n'en sont pas moins précieuses dans la mesure où elles permettent d'effectuer des recoupements et des comparaisons dans un milieu où les observations hydrologiques sont jusqu'alors peu nombreuses.

III. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS:

Elles sont extraites des différents rapports de campagne des premières études de chacun des bassins, et regroupées dans les tableaux 1 à 6 de l'annexe 2-B.I,4. Les paramètres morphométriques mesurés et calculés à partir de la couverture cartographique IGN au 1/200.000 sont ceux habituellement retenus: superficie (A), altitudes (max et min),

périmètre stylisé, coefficient de compacité ($\approx 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$), longueur et largeur du rectangle équivalent, dénivelée spécifique (D_s) correspondant à 90% des altitudes médianes du bassin, enfin les indices de pente global ($IG = \frac{D_s}{L}$) et de Roche I_p (Roche, 1970), faisant intervenir une pondération par les surfaces des pentes élémentaires du bassin. L'altitude moyenne des bassins peut être déduite graphiquement de leur courbe hypsométrique (figures 2-B.1 à 2-B.6). Sur cette dernière, l'altitude moyenne correspond à la valeur 50 % de la surface du bassin.

Le classement du relief, défini par l'ORSTOM pour des superficies ne dépassant pas 25 km² (Dubreuil, 1972), n'est la plupart du temps pas applicable en raison de l'importance des bassins; mais à leur tête, les petites unités qui confluent appartiennent souvent aux classes de relief les plus élevées R₄ à R₆.

Les études hydrologiques ORSTOM ont porté sur des aires de bassin variées. Si l'on excepte le très grand bassin du Zilalet dont l'observation hydrologique n'a été qu'esquissée, les bassins étudiés présentent des surfaces comprises entre celle du Téloua (1635 km²) et celle du petit bassin expérimental, dit "élèves" (0,306 km²) d'Azél.

Mais plus que les superficies, ce sont les altitudes et les paramètres morphométriques qui permettent de distinguer les grands types de bassins du massif (Dubreuil, 1970).

1) Les bassins d'altitude à forte dénivelée permanente:

Ils appartiennent aux massifs les plus importants au nord et à l'est de l'Aïr qui dominent les hautes surfaces intérieures entre 700 et 800 mètres. Leurs altitudes moyennes sont supérieures à 1000 mètres, les pentes sont fortes et les courbes hypsométriques (fig 2-B.1,2,3) témoignent de la vigueur du relief: bassins d'Iférouane, Timia et Tabelot (Hœpffner, 1977, 1978, 1979, 1980)

a) Les bassins d'Iférouane: (tab.1 annexe 2-B.I,4; fig.1 annexe 2-B.I,5)

– Le bassin du kori Tamgak qui draine, dans sa partie centrale et sur 620 km² le massif de granites subvolcaniques à structure annulaire de même nom, présente une forte dénivelée de plus de 1300 mètres sur une cinquantaine de kilomètres. La pente globale qui approche 2 % est localement, et en particulier à la tête du bassin, beaucoup plus forte.

Ces pentes élevées et le coefficient de compacité, relativement modeste (1,42), confèrent à ce bassin aux surfaces ruisselantes, et malgré l'importance de sa superficie, une des plus fortes capacités de réponse hydrologique du massif.

– Le bassin du kori Iberkoum (845 km²) concerne, dans sa partie amont, le flanc sud-est du Tamgak où les pentes sont élevées. La dénivelée (1200 m) est presque aussi importante que sur le bassin précédant, mais la courbe hypsométrique (fig.2-B.1) montre que

près de 50 % des surfaces du bassin (à l'aval) sont concernées par des variations d'altitudes beaucoup plus faibles (concavité prononcée).

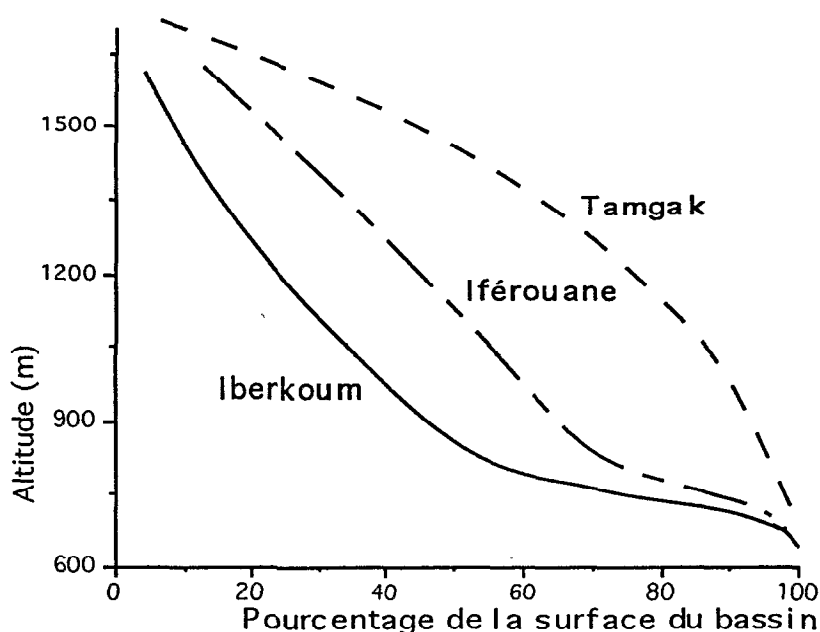


Fig. 2-B.1: Hypsométrie des bassins d'Iférouane

Ces surfaces moins pentues à l'aval, un coefficient de compacité (1,6) et une superficie plus importants altèrent la capacité de réponse du bassin; d'autant que sa partie aval comporte d'importants remplissages alluvionnaires qui facilitent la dégradation des écoulements par division du réseau et infiltration.

Le kori Iberkoum reçoit en rive gauche le kori Faodet issu de l'Enfoud, autre structure annulaire. Les caractéristiques de cet important bassin affluent sont comparables à celles d'Iberkoum.

Ainsi, malgré leur proximité et la similitude d'un certain nombre de caractères physiques, les bassins Tamgak et Iberkoum présentent des capacités d'écoulement bien différentes.

– Le bassin du kori Iférouane, essentiellement issu de la confluence des deux bassins précédents, présente donc des caractéristiques intermédiaires.

b) Les bassins de Timia (tab.2 et fig.2 des annexes 2-B.I,4 et 5)

Leurs superficies sont beaucoup plus modestes (de 40 à 160 km²) car elles concernent le drainage de structures moins importantes; Egalah au nord-ouest, Iskou et Aroyan au sud-est. Les fortes dénivelées (600 à 800 m), sur des surfaces réduites, génèrent des pentes moyennes élevées (2,7 à 5 %) pour les bassins I, II, et III qui drainent les hautes surfaces des massifs granitiques (fig.2-B.2).

Les pentes du bassin IV qui réunit, en aval de Timia, les koris Timia et Guije, sont nettement plus réduites (1,4 %) en raison du barrage de la vallée par une coulée basaltique qui a entraîné un ennoyage de la vallée sous plusieurs dizaines de mètres de sédiments grossiers sableux, dans lesquels la dégradation, tant hydrographique que volumique des écoulements, est importante.

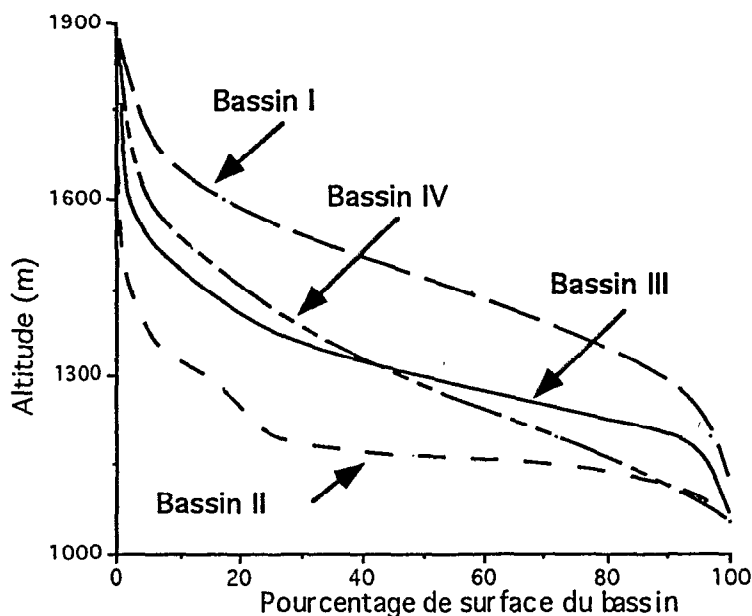


Fig. 2-B.2 : Hypsométrie des bassins de Timia

Comme dans le cas des bassins d'Iférouane, les bassins de Timia sont susceptibles de produire des réponses très différentes aux événements météoriques, en fonction de l'évolution des pentes sur le bassin, mais surtout en raison de l'existence, ou non, de zones d'accumulations détritiques:

- Les écoulements des bassins I et II issus de fortes pentes imperméables, transitant dans des lits alluviaux peu développés, pourront présenter un caractère immédiat et torrentiel.

- Ceux du bassin III, bien qu'issus de pentes aussi fortes, sur des matériaux granitiques de même type, sont tempérés par l'existence de la cuvette Guijé, cernée par les monts Iskou et Aroyan. Cette haute surface, aux molles ondulations détritiques (Morel 1984), occasionne une dégradation du réseau avant que la barrière créée par l'Aroyan n'oblige les écoulements à se reconcentrer pour la franchir par une passe étroite. Au delà ils retrouveront, dans le bassin IV, les conditions d'une nouvelle dégradation.

c) Les bassins de Tabelot (tab.3, fig.3 des annexes 2-B.I,4 et 5)

Sur la bordure sud-orientale du massif annulaire des Bagzanes ils joignent, pour deux d'entre eux, la haute surface tabulaire (1600 à 1800 m) d'un socle micro-granitique, marqué de vestiges volcaniques rhyolitiques ou syénitiques, à un piémont détritique 700 à 800 mètres plus bas. Ces bassins, de surfaces intermédiaires (240 à 320 km²) entre les bassins d'Iférouane et de

Timia, présentent donc également des pentes prononcées, en particulier sur la bordure du massif où de véritables gorges précipitent en cascade vers le pied du massif les eaux rassemblées sur sa surface sommitale. Les brusques infléchissements (fig.2-B.3) des courbes hypsométriques traduisent ce fait.

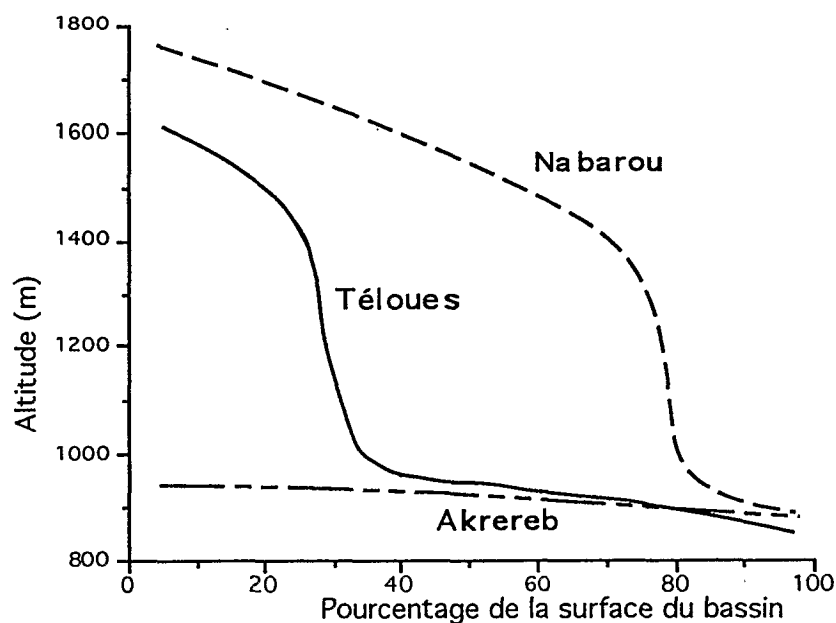


Fig. 2-B.3: Hypsométrie des bassins de Tabelot

– Le kori Nabarou possède près de 70 % de la superficie de son bassin (244 km²) sur la surface sommitale imperméable, et seulement 20 % au pied du massif, jusqu'à la station S₂. Le coefficient de compacité élevé (1,9) traduit surtout l'étirement du bassin à la rupture de pente.

– Le kori Téloues, à l'inverse, ne développe qu'une faible partie (20 %) de son bassin au sommet des Bagzanes, pour plus de 60 % en zone de piémont, où le développement de la vallée alluviale facilite les infiltrations et la dégradation du réseau hydrographique à l'approche de la station S₁.

– Le kori Akrereb ne concerne, en position de piémont et d'abri (est du massif), qu'un bassin beaucoup plus réduit (26 km²). Les pentes sont de trois à quatre fois plus faibles, et la potentialité des écoulements apparaît, de ces faits, très dégradée.

2) Les grands bassins représentent successivement tous les types d'écoulement:

Les têtes de bassins sont situées, au dessus de 1500 mètres, sur les hautes surfaces compactes et imperméables du massif. Les pentes sont fortes à très fortes, et la capacité de réponse de cette partie des bassins est généralement aussi rapide qu'importante.

Le drainage des zones de piémont et des surfaces du socle plus ou moins dégradées, qui occupent une grande partie du cœur de l'Aïr, représente des conditions d'écoulement très variables en fonction du degré d'altération du milieu. Le coefficient de compacité assez faible et

les pentes encore soutenues permettent aux écoulements de conserver une certaine potentialité lorsque les sols sont peu altérés. Lorsque ce n'est pas le cas, les écoulements connaissent une première dégradation, généralement plus par infiltration dans les dépôts alluviaux des lits, que par divergence du réseau hydrographique.

A l'approche de la bordure du massif, progressivement, la dégradation augmente, en liaison toujours avec le développement du lit alluvial.

A la sortie du massif, l'entrée des écoulements dans la dépression périphérique sud et ouest, s'effectue sur de véritables cônes de déjection. La dégradation hydrologique s'accroît jusqu'à l'endoréisme, à la fois par diminution des pentes, augmentation des capacités d'absorption du milieu alluvial et multiplication des diffluents du réseau.

Le bassin du Téloua au sud-ouest constitue à l'instar du Rarous, du Zilalet ou de l'Anou Makaren, un exemple caractéristique de ces grands drainages composés du massif; tab.4, fig.4 des annexes 2-B.I,4 et 5 (Hœpffner et al., 1980)

a) La tête du bassin du Téloua se situe au sommet du mont Todgha à près de 1900 mètres d'altitude:

Deux émissaires d'égale importance, le Bédeï et l'Aghaoua, dévalent les pentes raides (10 %) et basaltiques de l'édifice volcanique avant de se rejoindre sur des formations gneissiques compactes dont les pentes sont encore conséquentes (4 ‰) jusqu'à la confluence (à 739 mètres) avec le bassin du kori Ouajoud venant de l'est. A ce point, la compacité ($\approx 1,2$), l'importance des pentes et l'imperméabilité des surfaces conservent au bassin un pouvoir ruisselant élevé (Annexe 2-B.III,1). Le transfert de ce ruissellement est peu dégradé par un milieu alluvionnaire des lits qui reste modeste.

b) A l'aval le bassin se resserre et rompt sa pente (fig.2-B.4)

Devenue celle du Téloua, la vallée connaît dans la région d'In Toukoufaouen (≈ 10 km à l'aval), un important rétrécissement qui explique la sensible augmentation du coefficient de compacité du bassin à Dabaga, première station de contrôle hydrologique à l'aval, et une brusque rupture de pente (7,5 %).

c) De l'amont de Dabaga (610 m) à Azel (526 m); le bassin intermédiaire:

Le retour à des pentes plus modérées, de l'ordre de 3 ‰, s'accompagne d'un redimensionnement du lit alluvial en largeur (100 à 150 m), comme en épaisseur; de quelques mètres à une quinzaine de mètres (Armand, 1986, 1987; Balmer, 1988; Joseph, 1989) à l'amont de petits seuils ennoyés qui individualisent les aquifères (Razel, In Doudou, Azel).

Dans cette partie du bassin le coefficient de compacité augmente fortement (1,78 à Azel), et la dégradation des écoulements est déjà importante en raison de la capacité du lit alluvial où les infiltrations interviennent massivement. Ces pertes potentielles ne peuvent être, la plupart du

temps, sérieusement compensées par les apports latéraux, en raison de l'étroitesse de la vallée (≈ 10 km) et du faible développement des bassins adjacents (quelques km^2) qui en découle.

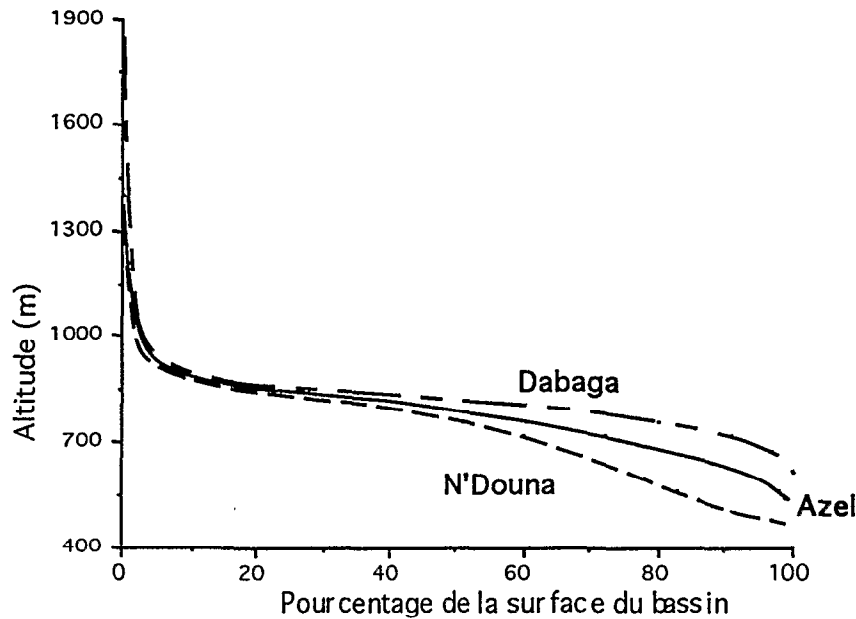


Figure 2-B.4: Hypsométrie du bassin du Téloua

d) A Alarcès, commence la cuvette d'Agadez (fig.5 de l'annexe 2-B.I,5)

L'entrée des écoulements dans la dépression périphérique s'effectue sur un cône de déjection sablo-limoneux d'épaisseur croissante vers l'aval (à Agadez il est de l'ordre de vingt mètres) qui occulte les formations gréseuses du Continental Intercalaire (Roussin-Bariac, 1985; Plata Bedmar et al, 1989; Ousmane et al, 1984). En fonction de l'importance des crues et des dépôts, les chenaux d'écoulement diffluent et se déplacent sur ce cône. Cette instabilité naturelle n'a pas été sans poser des problèmes à la ville d'Agadez dont une partie se trouve en dessous du lit mineur actuel, sur le site d'un ancien écoulement (quartier de la poste). En 1980, une partie des eaux d'une crue importante empruntera, après avoir forcé une petite digue, cet ancien lit, anéantissant les maisons de ce quartier (Bouvier et al., 1982).

Plus avant, et jusqu'à Kerboubou, la dégradation se poursuit en raison de l'élargissement de la zone d'épandage des crues et de la diminution des pentes (sites Enonz, Quatorz). Au puits de Kerboubou, à 25 km d'Agadez, les rares écoulements résiduels qui parviennent jusque là, se reconcentrent pour pénétrer dans la dépression argilo-limoneuse de l'Ighazer wan Agadez où l'endoréisme se complète, aussi bien par évaporation qu'absorption.

3) Les bassins en bordure de l'Aïr ou affluents de bassins plus importants:

a) Les bassins en bordure sud de l'Aïr: (fig.6 de l'annexe 2-B.I,5):

Par rapport aux grands bassins ils ne connaissent pas d'altitudes supérieures à 1000 m et leurs dénivelées sont plus faibles. Mais leurs pentes moyennes restent significatives (0,7 %

pour le bassin de Tchirozérine, 1 % pour le bassin d'Amdigra) et leurs écoulements ne sont que modérément dégradés avant l'arrivée dans la dépression périphérique de l'Air.

b) Les bassins affluents des grands émissaires: Leurs capacités sont variées en fonction de leur taille et de leur situation

– Les bassins affluents proches des têtes de grands bassins possèdent les mêmes caractéristiques physiques que ces derniers (fortes pentes, sols imperméables, faibles accumulations alluviales des lits) et sont donc représentatifs de conditions locales optimales de ruissellement et d'écoulement. Le bassin d'El Méki (fig.7, annexe 2-B.I,5) avec sa dénivelée de 1200 m pour une longueur d'une trentaine de kilomètres (pente moyenne $\approx 4\%$) est le type même de ces bassins à forte potentialité.

– Les petits bassins affluents du Téloua dans sa partie intermédiaire, Acharak, In Azena, In Tiziouen ... (tab.5, fig.8, annexes 2-B.I,4 et 5), bien que ne possédant pas une dénivelée aussi importante (quelques dizaines de mètres), présentent de par leur développement réduit de quelques km², des pentes moyennes fortes (jusqu'à près de 4 %) qui, appliquées à des sols bruts (gneiss leptynitiques et granites calco-alcalins syntectoniques de Dabaga) peu altérés, induisent d'importantes capacités d'écoulement (fig.2-B.5)

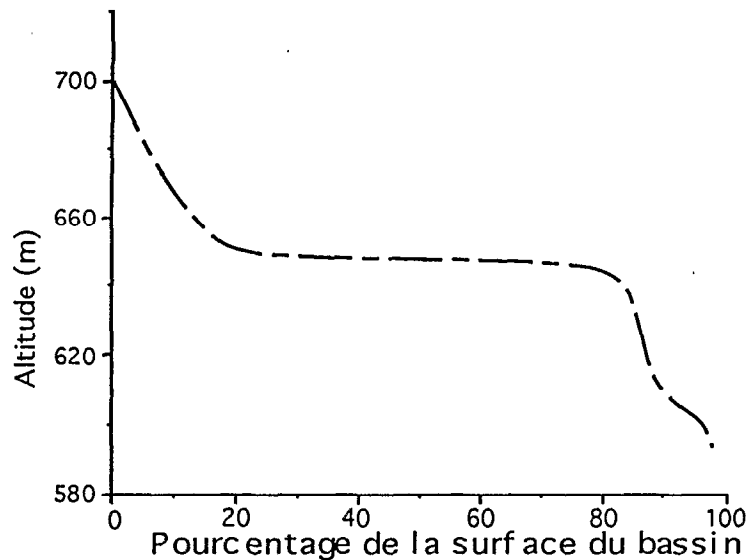


Fig. 2-B.5: Hypsométrie du bassin d'Acharak

– A la différence des petits bassins précédents, celui d'Azamella (61 km²), en raison de son importance relative et de sa position affluente très proche du cône de déjection du Téloua, présente des développements alluviaux importants dans sa partie aval qui, malgré une pente moyenne de 1% (Fig.2-B.6) sont en mesure d'altérer de façon significative ses écoulements (tab.6, fig.9, annexes 2-B.I,4 et 5), Hœpffner et al. (1980).

– Le bassin versant d'Agassaghas est, comme le bassin "élève" (tab.6, fig.10, annexes 2-B.I,4 et 5), représentatif de l'environnement détritique de reg sur matrice sablo-argileuse (Valentin, 1985) qui se développe à la périphérie du massif.

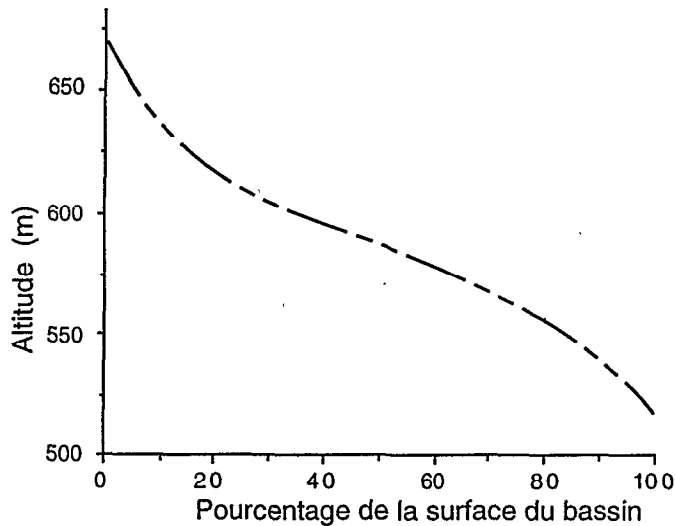


Fig. 2-B.6: Hypsométrie du bassin d'Azamella

– Le bassin élève comporte deux parties très distinctes (Amri et al., 1986):

La partie amont, aux pentes nulles ou très faibles (absence de réseau sur la figure), est une zone de rétention, et, lorsque le seuil d'imbibition est dépassé, d'écoulements lents et diffus en nappe. Cette partie du bassin apparaît donc fortement dégradante pour les écoulements.

Lorsque la topographie s'infléchit vers le Téloua tout proche, le bassin retrouve une forte potentialité (apparition du réseau sur la figure 10 de l'annexe 2-B.I,5).

Le bassin d'Agassaghas relève des mêmes types de sols, mais présente une pente régulière qui limite la rétention au gonflement des argiles du sol. Les écoulements sont donc globalement peu altérés sur ce bassin.

CONCLUSION:

Les sols en grande partie imperméables, et les pentes souvent prononcées, confèrent aux bassins de l'Aïr de fortes potentialités d'écoulement. Ces dernières s'altèrent progressivement, en liaison avec la diminution des pentes et l'accroissement, simultané vers l'aval, de la capacité de stockage des nappes alluviales. Dans la dépression sédimentaire périphérique, la dégradation est totale au travers des cônes de déjection, qui provoquent diffusions et infiltrations massives. L'Aïr est un milieu endoréïque, comme la plupart des massifs subdésertiques d'altitude, dans les conditions climatiques actuelles.

CHAPITRE 3

"LES TRANSFERTS LIQUIDES ET SOLIDES"

A _ LES ECOULEMENTS

I. CARACTERISTIQUES DES ECOULEMENTS

Compte tenu des conditions générales définies aux chapitres précédents; sols et végétations offrant peu de résistance au ruissellement, les pentes étant élevées et les averses présentant toujours un caractère orageux, bref mais intense; les écoulements de l'Aïr s'apparentent à ceux des "oueds" maghrébins, temporaires et brutaux. Les temps de montée très courts, n'excédant généralement pas quelques dizaines de minutes, conduisent à des débits de pointe élevés, qui sont suivis de décrues dont le fort coefficient de tarissement limite le développement à quelques heures, quelques dizaines d'heures dans les cas les plus favorables.

L'environnement naturel et le type d'écoulement déterminent la morphologie et la dynamique fluviale (Annexe 3-A.I,0). Les annexes 3-A.I,1 à 36, qui présentent les caractéristiques des crues de l'Aïr depuis 1975, montrent que ce schéma général d'écoulement est néanmoins marqué de variations notables liées à la situation et à la taille des bassins versants:

1) Les écoulements des petites unités ou des têtes de bassin dans le massif:

Ils présentent les caractères les plus torrentiels liés à des facteurs conditionnels particulièrement favorables au ruissellement (cf chap 2-B), figures 3-A.1 et 2.

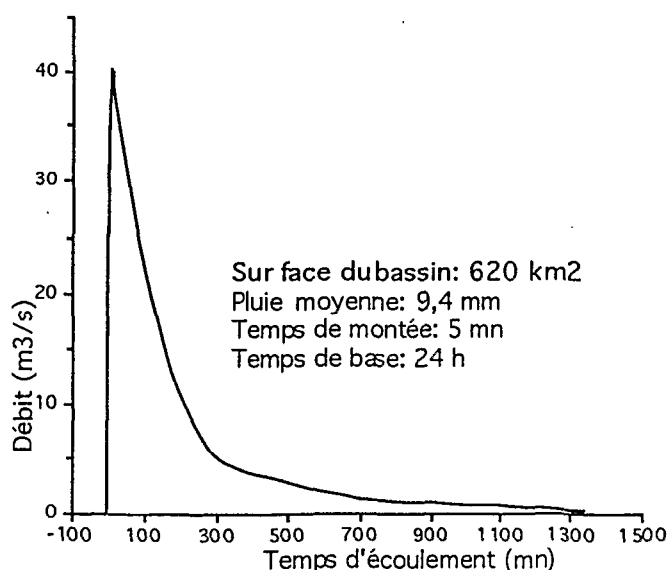


Fig. 3-A.1 hydrogramme de la crue du 16-17 août 1979 sur Tamgak S1

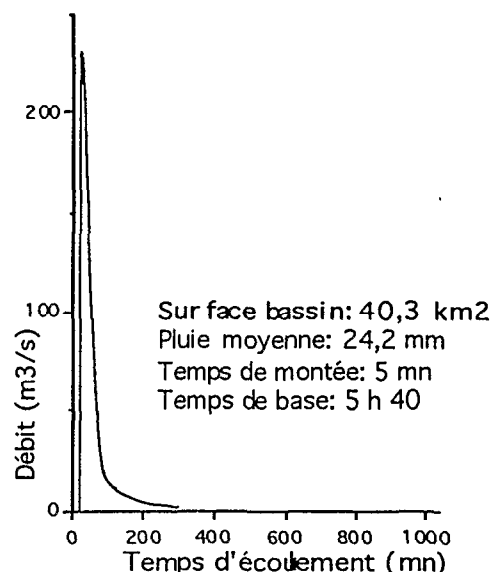


Fig. 3-A.2 hydrogramme de la crue du 21 août 1979 sur Timia S1

L'allure des hydrogrammes est très dissymétrique. Des temps de montée très courts sont observables sur les événements des bassins d'altitude d'Iférouane, de Timia ou de Tabelot

(annexes 3-A.I,25 à 36). Les débits passent sur ces bassins de "0" à quelques dizaines, voir quelques centaines de $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, en quelques minutes.

Le record en la matière semble être, sur les quelques années observées, celui de la crue du 4 août 1977 sur le bassin Tamgak S1, où les débits, partant de zéro, atteignirent $1380 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en 30 minutes; soulignant la capacité de ces bassins montagnards à produire de véritables murs d'eau.

Le rôle de la superficie collectrice, dont l'accroissement amortit en principe l'onde de crue, apparait ici relativement faible face à ceux de la capacité de ruissellement des sols et de la pente des versants. Un réel amortissement des écoulements n'est noté que lorsque le transit rencontre des conditions de piémont.

2) Première dégradation des écoulements sur les piémonts des bassins intérieurs:

a) Le cas des koris de la région d'Iférouane (Hœpffner et al, 1976, 1977, 1978; Harang et al, 1980; Ribstein et Pépin, 1982)

Le rôle de ces premiers piémonts à la sortie, et parfois même au sein des massifs centraux, se traduit essentiellement par une diminution des pentes et un développement des milieux alluviaux. La figure 3-A.3 montre cette évolution des écoulements au cœur du massif des monts Tamgak à proximité d'Iférouane.

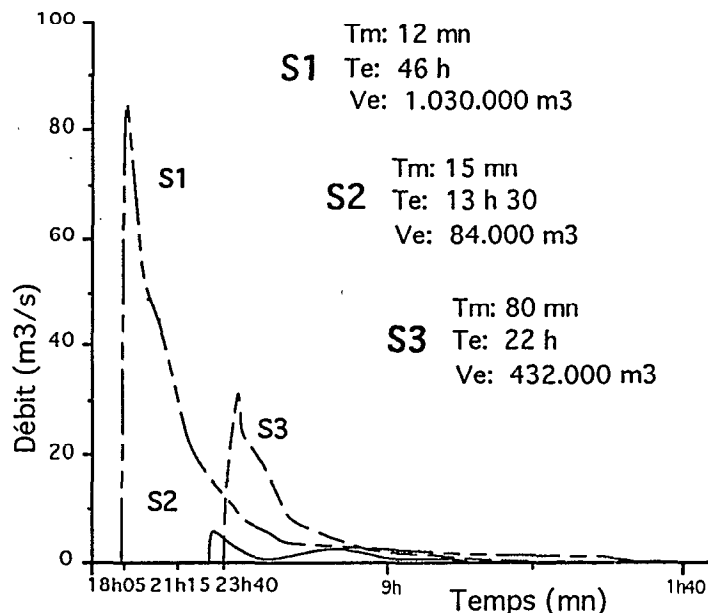


Fig. 3-A.3 Hydrogrammes de l'évènement du 24-26/6/79 sur les différents bassins d'Iférouane

Le kori Tamgak collecte bilatéralement, dans une gouttière aux développements alluviaux limités, les eaux des hautes surfaces des monts Tamgak. Les transferts latéraux sont très rapides et simultanés, pour peu que l'averse soit homogène, en raison de la bonne compacité du bassin. Cela explique l'arrivée brutale des eaux à la station S1, où le temps de

montée de la crue, jusqu'à près de 100 m³/s, n'est que de 12 minutes le 24 juin 1979 en fin d'après midi.

Le kori Iberkoum ne draine lui que la partie sud du massif Tamgak et le piémont de l'Enfoud (kori Faodet; cf chap.2-B.III). Une bonne partie du bassin est marquée par la dégradation du réseau au travers d'un système détritique et alluvionnaire croissant vers l'aval. Ces conditions dégradées de transfert expliquent l'arrivée de volumes d'eau beaucoup plus limités à la station S2, et avec près de trois heures de retard sur celles de la station S1, si on veut bien considérer que les deux événements sont issus de la même averse.

Le kori Iférouane qui réunit ces deux koris possède les plus grands développements alluviaux à la sortie du massif (annexe 2-B.I,5). Le flot est brisé, à la fois par la forte limitation des pentes, et par la capacité d'absorption du milieu. La crue n'arrive à la station S3 que près de 6 heures après les premières manifestations à S1. Le temps de montée est beaucoup plus long (80 mn) et le débit de pointe amoindri des deux tiers.

Enfin il est intéressant de noter que lorsque cesse l'écoulement à Iférouane, le 25 en fin de soirée, un écoulement résiduel existe toujours à la station S1, qui se poursuivra pendant près de 24 heures, soulignant la différence de capacité des deux systèmes alluviaux.

Une relation significative existe entre les pertes constatées à Iférouane et la somme des débits amont essentiellement figurée par les apports de Tamgak S1 et Iberkoum S2 (Fig.3-A.4).

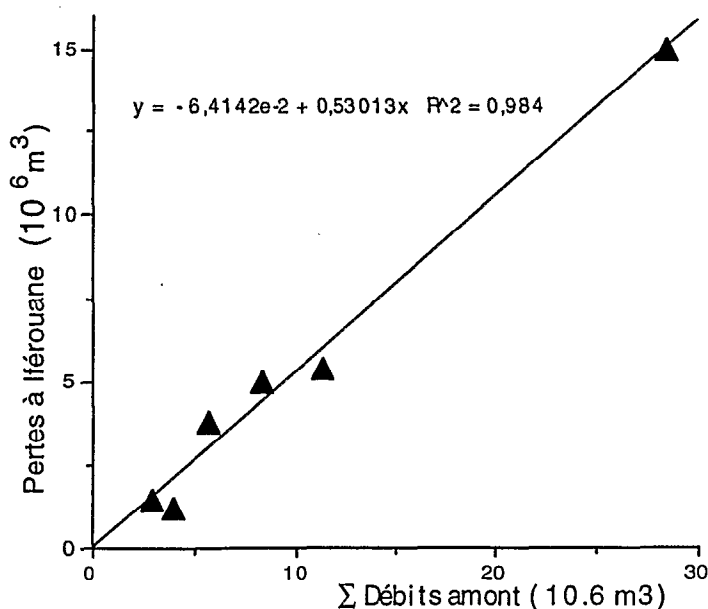


Fig. 3-A.4 Pertes des écoulements dans le piémont des monts Tamgak

La capacité de chacun des bassins de la région d'Iférouane est mise en valeur par l'annexe 3-A.I,32 qui fait le bilan des écoulements des trois bassins pour la période 1975-1980: Les lames écoulées et coefficients d'écoulement moyens apparaissent particulièrement explicites; un facteur dix existe entre les phénomènes du bassin Tamgak ($K_e = 21\%$) et ceux du bassin

Iberkoun-Faodet ($Ke = 2,18 \%$). La réunion de ces effets et l'accentuation du poids de la nappe à la confluence se traduit logiquement par des valeurs intermédiaires, mais plus proches, à la station S3, de celles d'Iberkoun ($Ke = 6,81 \%$).

b) Le cas des koris de la région de Timia: (Hoepffner, 1977; Hoepffner, 1978; Harang et al, 1980; Sardouk, 1982; Ben Abdelfadel, 1984)

Les mêmes observations que précédemment auraient pu être formulées sur les hauts bassins de Timia qui présentent la même disparité dans leurs potentialités: (annexe 3-A.I,33):

Le bassin du kori Timia possède la même capacité de ruissellement que celui du kori Tamgak, mais sa superficie et son milieu alluvial plus limité lui assurent un pouvoir de restitution de l'averse encore plus grand: le coefficient d'écoulement moyen approche 30% (28,3), certaines valeurs apparaissant remarquables (60%).

Le bassin du kori Guijé (S3) présente un peu les mêmes types de conditions que le kori Iberkoun (la surface en moins), et la dégradation des écoulements y est aussi nette ($Ke: 2,6 \%$).

Le bassin qui constitue la zone réceptrice (S4) des deux bassins précédents est très particulier en raison de la capacité exceptionnelle de sa nappe alluviale liée au verrouillage de la vallée par une coulée basaltique. Le piégeage des écoulements y est très important comme en témoigne le coefficient d'écoulement (Ke) de seulement 4% à l'exutoire, en 1976 et 1977, malgré les valeurs record enregistrées sur le bassin S1.

c) Le cas des koris de Tabelot: (Hoepffner, 1978; Hoepffner et al., 1979; Hoepffner et Delfieu 1980; Sardouk, 1982)

Il apparaît particulier dans la mesure où ses deux plus grandes unités, Téloues (S1) et Nabarou (S2) subissent déjà, sur la surface sub-horizontale des Bagzanes, en tête de leurs bassins, une certaine dégradation de leurs écoulements, dont les valeurs caractéristiques sont de ce fait plus faibles que pour Tamgak S1 ou Timia S1; de l'ordre de 8 à 10% pour le Ke (annexe 3-A.I,25 à 28). Mais à la faveur d'événements ou d'années hydrologiquement plus favorables ces valeurs peuvent être aussi élevées: le Ke approche 30% sur le bassin Nabarou en 1980.

Le petit bassin (26 km^2) d'Akrereb (S3), en position de piémont, qui paraissait posséder des potentialités plus limitées compte tenu de pentes plus faibles, révèle en fait une particulière capacité au ruissellement, en raison sans doute de ses dimensions réduites et d'un pourcentage de surfaces imperméables, sur socle, important ($23 \% < Ke < 37 \%$).

Dans les massifs centraux la potentialité des bassins, quelle que soit leur taille, est donc élevée, en liaison avec les pentes et l'imperméabilité des hautes surfaces. Des signes de dégradation apparaissent cependant dès qu'un milieu alluvial fait son apparition.

Les grands bassins périphériques, où les accumulations détritiques, consolidées ou non, sont importantes, mettent bien en évidence le rôle joué par ce milieu sur l'affaiblissement des écoulements produits par le massif; jusqu'au phénomène absolu d'endoréisme.

3) Un exemple de dégradation des écoulements sur grand bassin; le Téloua: (Hœpffner, 1980, 1981; Billon et al., 1981,1982,1983; Bouvier et al., 1982; Bricquet et al., 1984, 1985; Gallaire et al., 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990).

a) Scénario des écoulements du Téloua:

De part son étendue (1360 km²) le bassin du Téloua présente successivement tous les types d'écoulement rencontrés dans l'Aïr.

A la tête du bassin, les pentes (10 %) du mont Todgha (1853 m) et l'imperméabilité des surfaces, constituent des facteurs très favorables aux écoulements. Cette situation subsiste, malgré une sensible diminution des pentes (4 ‰), sur les hautes surfaces gneissiques avant la confluence des trois principaux collecteurs du haut bassin; Beideï, Aghaoua et Ouajoud, en raison de la faiblesse des milieux alluviaux. Il est vraisemblable, malgré l'absence de mesures, mais par analogie avec les résultats obtenus dans des conditions similaires, que les coefficients d'écoulements à In Toukoufaouène, défilé qui marque à 12 km en amont de Dabaga la limite aval du haut bassin, soit au moins égaux à 25 %.

A partir de ce site la pente moins forte (3 ‰) favorise le développement de masses alluviales plus importantes dans un lit qui s'élargit (100 à 150-m) malgré le resserrement du bassin à une dizaine de kilomètres. Trois stations, Dabaga, Razel et Azel permettent de suivre, avant sa sortie du massif, les écoulements du kori. Car à l'aval de la station d'Azal la diffluence des eaux sur le vaste cône de déjection de la cuvette d'Agadez amplifie un processus de dégradation, qui s'accélère des radiers Toudou de la route Tahoua-Arlit (RTA; à proximité d'Agadez) à N'Douna, sortie de la cuvette, où l'endoréisme est souvent complet.

La figure 3-A.5 montre la progression de la crue du 2 au 4 juillet 1979 entre Dabaga et N'Douna.

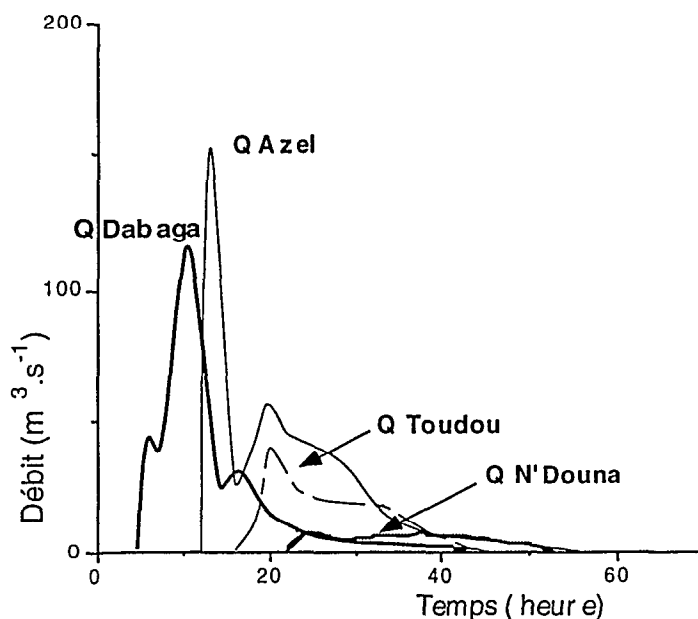


Fig. 3-A.5 Hydrogrammes de la crue du 2 au 4 juillet 1979

Cette crue de près de 120 m³.s⁻¹ à Dabaga met 8 heures pour arriver à Azel, où les débits

plus élevés, jusqu'à $160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, montrent que des apports sont intervenus sur le bassin intermédiaire. Les écoulements parviennent aux radiers moins de cinq heures plus tard, mais la montée du flot dure elle même plus de cinq heures et les débits de pointe y apparaissent très altérés ($40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Il faut à nouveau plus de cinq heures à l'onde de crue pour parcourir la dizaine de km qui sépare les radiers de N'Douna. Elle y parvient très amortie (débit max = $6,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) près de vingt quatre heures après le début des écoulements à Dabaga, 70 km en amont.

Le fait que cette crue d'importance moyenne soit parvenue jusqu'à N'Douna souligne l'état de saturation déjà avancé rencontré par ses écoulements; ce qui leur a permis de ne pas être totalement absorbés avant la sortie de la cuvette. La dynamique de cette crue correspond donc à des conditions particulièrement favorables de transfert des eaux du Téloua.

b) Bilan des écoulements:

L'appréciation de la dégradation des écoulements par infiltration dans le milieu alluvial aurait pu s'effectuer simplement à partir de la différence des volumes écoulés d'un point de contrôle à l'autre, si les secteurs intermédiaires n'étaient susceptibles d'apporter leur propre participation. Il a donc toujours été nécessaire, à l'échelle du bilan annuel, d'estimer cet apport intermédiaire pour assurer au calcul un maximum de vraisemblance.

_ Bilan des écoulements entre Dabaga et Azel

Sur ses 336 km^2 de surface, cette partie du bassin, contituée d'une vallée rétrécie aux versants pentus (2 à 3 %), laissant souvent affleurer la masse granitique du socle, présente une assez grande homogénéité et une particulière aptitude au ruissellement.

En absence de mesure jusqu'en 1988 sur cette partie du bassin, le choix d'un coefficient de ruissellement à appliquer à la pluie moyenne du secteur, pour obtenir le volume des apports, n'a pu s'effectuer qu'à partir de comparaisons avec les données anciennes des BVR (Bassin Versant Représentatif) de Razel, In Tizioucn et In Azena, (Lefevre, 1959,1960; Roche, 1964) et surtout à partir de comparaisons avec les données du bassin d'Azamella qui jouxte le bassin du Téloua à cet endroit (Billon et Pepin, 1981-1982; Ribstein et al, 1983). Ce choix était également guidé par la quantité précipitée, bien que la relation Ke-Pluie annuelle soit avant tout dépendante de l'efficacité, donc de la concentration et de l'intensité des événements.

L'installation en 1988 du BVR d'Acharak ($2,13 \text{ km}^2$), en rive droite du Téloua (sa tête constituant une ligne de partage des eaux avec le bassin d'Azamella) va permettre de mieux apprécier la valeur du ruissellement sur le bassin intermédiaire. Les résultats obtenus à partir de pluviosités très différentes montrent que les coefficients d'écoulements élevés (Ke), obtenus à partir des pluies moyennes (Pl moy) et des lames d'eau écoulées (Lee), sont peu dépendants de la quantité précipitée; ce qui souligne la faible importance des secteurs d'interception sur ce bassin (tableau 3-A.1).

Année	Pl moy (mm)	Lee (mm)	Ke (%)
1988	230	104	45,2
1989	121	60	49,6
1990	147	74	50,3

Tab. 3-A.1 Relation pluie-écoulement sur le BVR d'Acharak

A la vue de ces résultats, il apparaît vraisemblable que les coefficients antérieurement choisis, à partir des valeurs du bassin d'Azamella (où une certaine dégradation existe), aient été sous-évalués; en particulier lorsqu'ils ont, comme en 1980, été estimés inférieurs à 30 %.

A partir de la relation de bilan suivante:

$$V_{\text{pertes}} = (V_e \text{ Dabaga} + V_e \text{ BVI}) - V_e \text{ Azel}$$

où V_{pertes} : Volume des pertes

$V_e \text{ Dabaga}$: Volume écoulé à Dabaga

$V_e \text{ BVI}$: Volume apporté par le bassin intermédiaire

$V_e \text{ Azel}$: Volume écoulé à Azel

Il est donc possible d'estimer le volume des pertes, ou du stockage, réalisé entre Dabaga et Azel, au détriment de l'écoulement, par le milieu alluvial. La fugacité des crues et leur passage en grande partie nocturne permet de négliger le rôle de l'évaporation sur l'écoulement. Le tableau 3-A.2 présente depuis 1980 le bilan des écoulements sur cette partie du bassin:

Année	Ve Dabaga	Ke Dab (%)	Ve Azel	Ke Az (%)	V pertes
1980	49	4,7	46	3,4	18
81	20	1,9	24	1,8	13
82	18	1,7	23	1,7	14
83	15	1,4	6	0,4	11
84	1,6	1,5	1,3	0,1	0,8
85	17	1,6	12	0,9	14
86	12	1,2	12	0,9	8,8
87	4,8	0,46	2,7	0,2	2,2
88	18	1,7	49	3,6	8,1

Tab. 3-A.2 Ecoulements et pertes annuelles de Dabaga à Azel entre 1980 et 1988 (en million de m³)

Le volume des pertes rapproché du signal d'entrée à Dabaga permet, malgré le rôle non dépendant joué par le bassin intermédiaire, de mettre en évidence une relation de type logarithmique dont l'expression est (fig.3-A.6):

$$V_{\text{Pertes}} = 12,365 \text{ Ln } V_{\text{Dab}} - 3,58 \quad r = 0,93$$

L'année 1988 se situe un peu à l'écart de la relation en raison de l'hydraulicité élevée du Téloua cette année là; l'importance des écoulements relativisant le rôle de la nappe.

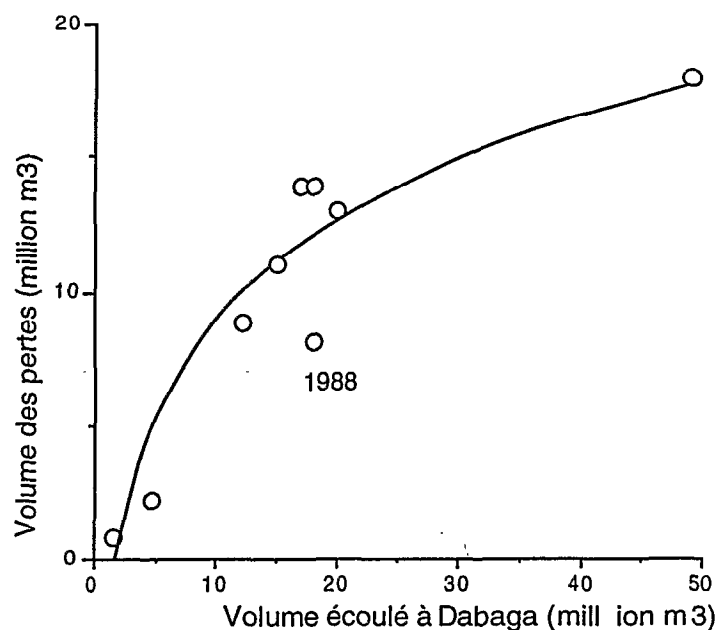


Fig. 3-A.6 Volume des pertes du BVI en fonction des volumes écoulés à Dabaga

– Bilan des écoulements entre Azel et Toudou (radiers RTA)

Le secteur de la pré-cuvette (150 km²) défini par le bassin compris entre Azel et la route Tahoua-Arlit (RTA) correspond à la partie amont du cône de déjection du Téloua en sortie du massif. Dans ce secteur, les premières grandes diffluences apparaissent; le Téloua se scindant à l'aval d'Alarcès, en deux bras, dont la tendance actuelle des écoulements est à un glissement vers le bras sud (et Agadez); le bras nord étant à une altitude supérieure de plus d'un mètre.

Les infiltrations dans cette partie du bassin sont particulièrement importantes. Elles participent de façon très significative à la recharge de la nappe alluviale utile à la ville. Les apports intermédiaires, bien identifiés, sont pratiquement limités aux écoulements des bassins d'Agassaghas (5,8 km²) et Azamella (61 km²). Car le reste des surfaces, constituées vers le nord de régosols aux molles ondulations (Valentin, 1985), ne présente guère de réseau hiérarchisé. Des écoulements en nappe inorganisés, le rassemblement du ruissellement dans de petites dépressions, d'origine hydro-éoliennes, participent à l'endoréisme local.

Le bilan des écoulements dans ce secteur est traduit par la relation suivante, utilisant les données de l'annexe 3-A.II,1:

$$V_e \text{ Toudou} = V_e (\text{Azel} + \text{Agassaghas} + \text{Azamella}) - \text{Infiltrations (pertes)}$$

La figure 3-A.7 illustre cette excellente liaison entre les valeurs annuelles:

$$V_e \text{ Toudou} = 0,745 V_e (\text{Azel} + \text{BVI}) - 1,098 \quad r = 0,996$$

Le volume des pertes entre Azel et les radiers est donc par analogie:

$$V_e \text{ Pertes} = 0,745 V_e (\text{Azal} + \text{BVI}) - V_e \text{ Toudou}$$

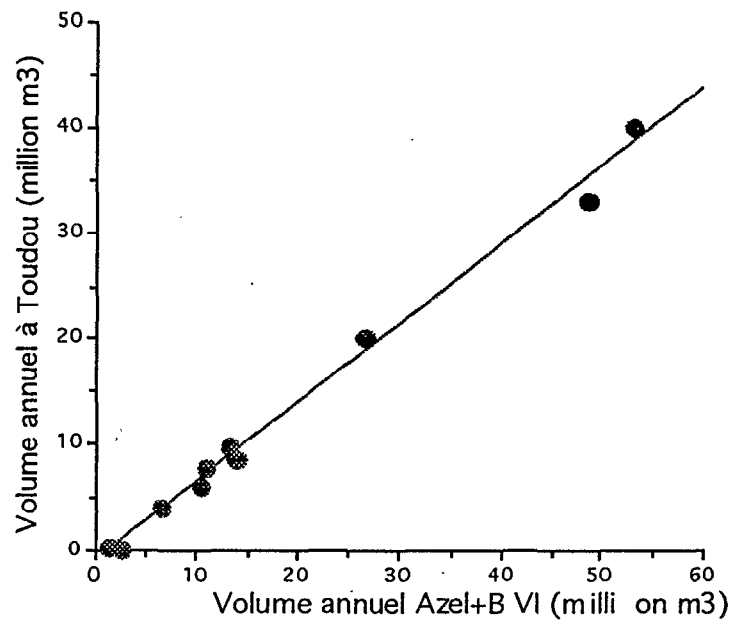


Fig. 3-A.7 Volume écoulé aux radiers en fonction des volumes d'Azal et du BVI

– Bilan des écoulements entre Toudou et N'Douna:

Entre les radiers et N'Douna la cuvette d'Agadez présente, sur une surface de 150 km², un élargissement du cône de déjection du Téloua, sur lequel les crues s'étalent et s'infiltrent massivement, malgré une proportion croissante de matériaux fins argilo-limoneux.

L'étude du bilan des écoulements dans la cuvette entre 1977 et 1979, ne tenant compte que des seuls apports intermédiaires d'Agassaghas et Azamella, montre l'importance de ces infiltrations dont les volumes sont exprimés en millions de m³ (Tableau 3-A.3):

Année	Volume Azel+BVI	Volume Toudou	Pertes p-cuvette	Volume N'Douna	Pertes Cuvette	Total pertes Cuvettes
1977	36	-		3	-	33
1978	25	-		1	-	24
1979	10,9	5,9	5	1,6	4,3	9,3

Tab. 3-A.3 Bilan des volumes écoulés et des pertes d'Azal à N'Douna entre 1977 et 1979

Une étude approfondie (Bouvier et al, 1982) sur un année hydrologiquement importante (1980) conduit à un bilan plus précis de la cuvette d'Agadez tenant compte de tous les paramètres disponibles; tableau 3-A.4 (volumes écoulés en million de m³)

Volume Azel	Apports Ag + Az	Volume Toudou	Volume N'Douna
46 (3,38)	2,74	33,1 (2,2)	15,3 (1,2)

Tab. 3-A.4 Bilan des volumes écoulés entre Azel et N'Douna en 1980

Les valeurs entre parenthèses du tableau sont celles des coefficients d'écoulement annuels qui diminuent logiquement vers l'aval avec l'accroissement de la superficie du bassin. Ce tableau montre également que, les années de forte hydraulicité, les volumes qui sortent de la cuvette sont loin d'être négligeables, malgré des pertes toujours importantes:

En 1980 le calcul des pertes, tenant compte des apports intermédiaires aux différents niveaux du bassin, conduit aux valeurs suivantes:

Pertes entre Azel et Toudou: 15,6 millions de m³

Pertes entre Toudou et N'Douna: 21,9 millions de m³

Soit un total de 37,5 millions de m³ de pertes dans la cuvette, cette année là, par infiltration essentiellement, pour un débit de sortie du massif à Azel de 46 millions de m³.

CONCLUSION:

Les écoulements du Téloua apparaissent donc de plus en plus altérés lors de leur progression vers l'aval. Si à l'intérieur du massif ils conservent une certaine potentialité, en raison de développements alluviaux limités au lit du kori, à la sortie la dégradation s'accélère en relation avec le décuplement du milieu infiltrant, la division et le ralentissement des écoulements sur le cône de déjection. Dans la cuvette la zone d'épendage des crues les plus importantes peut représenter plusieurs dizaines de km². Mais l'évaporation, malgré son intensité (> 10 mm/j), ne peut, compte tenu de la fugacité des écoulements, que s'exercer sur des temps courts (1 à 3 jours) qui limitent ses prélèvements à une centaine de milliers de m³/j au plus.

II. CARACTERE STATISTIQUE DES ECOULEMENTS

Deux types de données apparaissent plus particulièrement intéressantes dans l'étude des écoulements; les volumes qui permettent d'estimer la capacité globale de transfert d'un bassin, et les débits de pointe qui permettent d'apprécier la réaction ponctuelle aux événements pluie les plus importants.

Dans l'Aïr, seules les stations situées au sud du massif disposent d'un nombre d'observations suffisantes pour permettre une véritable investigation statistique. Mais le caractère homogène, par secteur, des conditions d'écoulement dans le massif, permet, à partir de la relation pluie-lame d'eau écoulée, obtenue à quelques stations, d'effectuer une estimation des apports annuels sur des bassins non mesurés en ne tenant compte que des précipitations; puisque la connaissance de la lame d'eau permet de s'affranchir des superficies.

1) Les volumes écoulés caractéristiques par secteur:

a) La région sud-Aïr:

Elle est la plus privilégiée, puisqu'avec le bassin du Téloua on dispose d'un catalogue de mesures sur presque vingt années à des stations comme Azel ou Dabaga. Les calculs statistiques

sont effectués à partir des valeurs du tableau de l'annexe 3-A.II,1:

Le tableau 3-A.5 présente les volumes correspondant aux fréquences caractéristiques exploitables; la figure 3-A.8 la distribution de ces valeurs à la station d'Azél.

Fréquences au dépassement	0,05	0,1	0,5	0,90	0,95
Dabaga	66	50	17	3,5	1,5
Razel	69	53	17	2,5	1,0
Azel	57	45	15	2,0	1,0
Agassaghas	-	0,490	0,105	0,005	0,001
Azamella	-	4,00	1,25	0,005	0

Tab 3-A.5 Caractéristiques statistiques des volumes écoulés sur le bassin du Téloua (en millions de m³)

A Razel, les valeurs élevées correspondant aux fréquences excédentaires soulignent la capacité d'écoulement de cette partie intermédiaire du bassin, bénéficiant il est vrai, la plupart du temps, des précipitations les plus abondantes du massif.

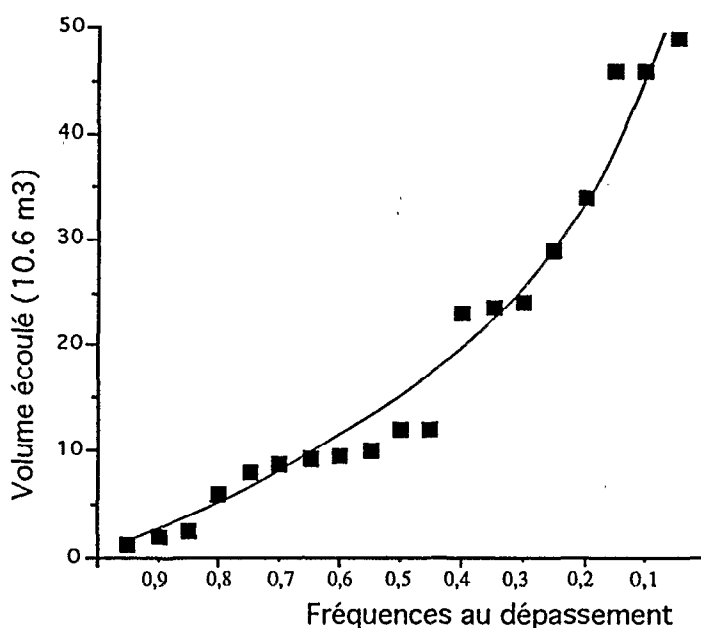


Fig. 3-A.8 Distribution des écoulements annuels du Téloua à Azel

Sur les petits bassins affluents de la près-cuvette un facteur 10, correspondant au rapport de leurs superficies, existe entre les valeurs moyennes et excédentaires du petit bassin d'Agassaghas (5,8 km²) et celui d'Azamella (61 km²). En revanche, en période déficitaire, l'écart s'annule et devient même favorable à Agassaghas pour la période de retour d'une année sur vingt, soulignant le rôle joué à Azamella par une nappe alluviale capable d'absorber une grande partie des écoulements les plus faibles.

Aux autres stations sud Aïr les séries sont trop faibles pour que l'on puisse effectuer un calcul statistique. Les valeurs d'écoulement annuel enregistrées aux stations de la région de

Razel et de Tchirozérine sont rappelées dans le tableau 3-A.6 pour mémoire:

Stations	1959	1960	1973	1988	1989	1990
In Tiziouène 1	58	41	-	-	-	-
In Tiziouène 2	25	11	-	-	-	-
In Azena	72	-	-	-	-	-
Acharak	-	-	-	222	128	158
Tchirozérine	-	-	4830	-	-	-

Tab. 3-A.6 Ecoulements annuels dans le région sud-Aïr (milliers de m³)

b) La région centre Aïr:

Elle est représentée par les bassins de Timia à l'est et par celui d'El Méki à l'ouest. Les six années d'écoulement enregistrées à Timia "1" entre 1976 et 1981, dont la première peu fiable (annexe 3-A.I,33), représentent une population encore trop limitée pour qu'un traitement statistique puisse être envisagée. Sur les autres bassins (2, 3 et 4) deux années seulement sont disponibles.

A El Méki les apports n'ont été mesurés qu'en 1974 ; $V_e = 9,11$ millions de m³. Cette valeur est assez remarquable pour un bassin dont la superficie n'est que de 186 km², mais qui, encore une fois, au pied des premiers reliefs importants du massif, bénéficie très souvent d'une pluviosité plus favorable que les autres bassins de l'Aïr.

c) La région est-Aïr est représentée par les trois bassins des Bagzanes,

Téloues, Nabarou, Akrereb pour lesquels seulement quatre années de données sont disponibles de 1977 à 1980 (annexe 3-A.I,25 à 28). Comme pour la région centre-Aïr, aucune étude statistique ne peut être envisagée. Il est néanmoins intéressant de noter que, sur seulement quatre années, des écarts très importants existent entre les valeurs; de 1 à 10 au minimum (1 à 50 sur Akrereb), en liaison avec les pluviosités les plus faibles et irrégulières du massif.

d) La région nord-Aïr (BV Tamgak)

Six années de données existent sur les trois bassins de la région d'Iférouane (annexe 3-A.I,32); et c'est encore une fois trop peu pour une étude statistique.

Une solution de secours existe cependant pour apprécier les écoulements caractéristiques de tous ces bassins, où les mesures ont été trop peu nombreuses (Billon, 1990)

2) Les écoulements caractéristiques des bassins insuffisamment observés:

Leur évaluation s'effectue à partir de deux types de relations exploitant les homogénéités par secteur des bassins. La première relation utilise la liaison qui existe entre la pluie moyenne sur un bassin et la lame d'eau qui résulte de cette pluie.

La seconde relation exploite le lien qui relie régionalement la pluie moyenne des bassins à celle d'un bassin proche plus longuement observé sur lequel un calcul statistique a pu être mené.

a) La région centre et sud Aïr:

Partant de l'intéressante liaison constatée entre les pluies des régions sud et centre Aïr (chapitre 2-A.III,2) une première relation a été recherchée entre les lames d'eau écoulées (Lee) et les précipitations annuelles des différentes unités du bassin du Téloua, et des bassins de Timia, El Méki et Tchirozérine. Après avoir éliminé trois ou quatre points qui altéraient manifestement trop la relation, différents ajustements ont été testés.

L'ajustement parabolique est celui qui a semblé s'adapter le mieux (fig. 3-A.9) aux 48 points retenus. La qualité de la relation est soulignée par la valeur du coefficient de corrélation hautement significatif ($r = 0,94$).

La relation régionale qui lie la lame d'eau écoulée à la pluie a donc pour équation:

$$Lee = 0,0025 P^2 - 0,0897 P + 0,7964$$

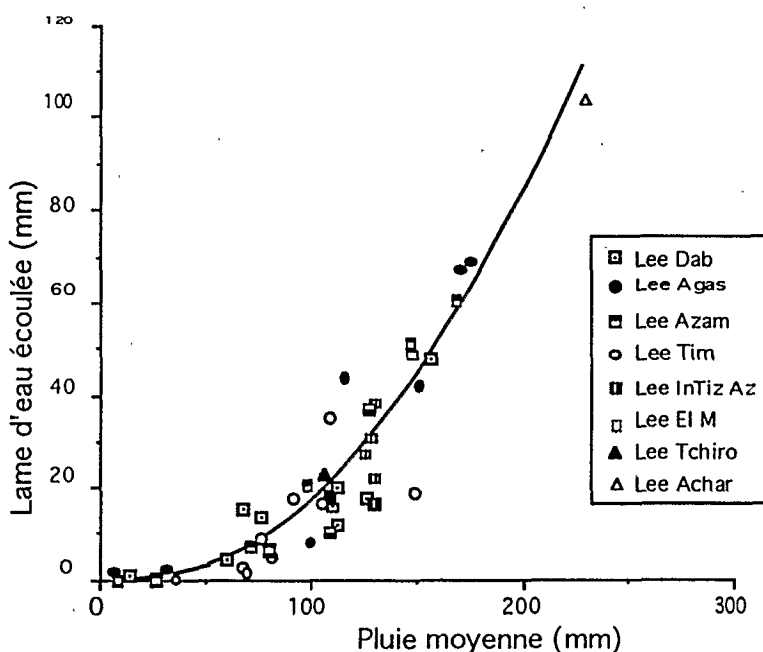


Fig. 3-A.9 Lame écoulée / Pluie moyenne (centre et sud-Aïr)

Connaissant d'autre part l'excellente relation liant souvent (sauf pour Timia, où elle reste médiocre) la pluie moyenne du bassin du Téloua à Azel à celle de la plupart des bassins sud et centre Aïr (annexes 2-A.III,8 & 9) il est possible, à partir de la distribution de cette pluie moyenne du Téloua à Azel (fig.3-A.10), d'estimer la distribution des pluies moyennes annuelles des bassins.

Par voie de conséquence une estimation de la distribution des écoulements devient possible (Tableau 3-A.7).

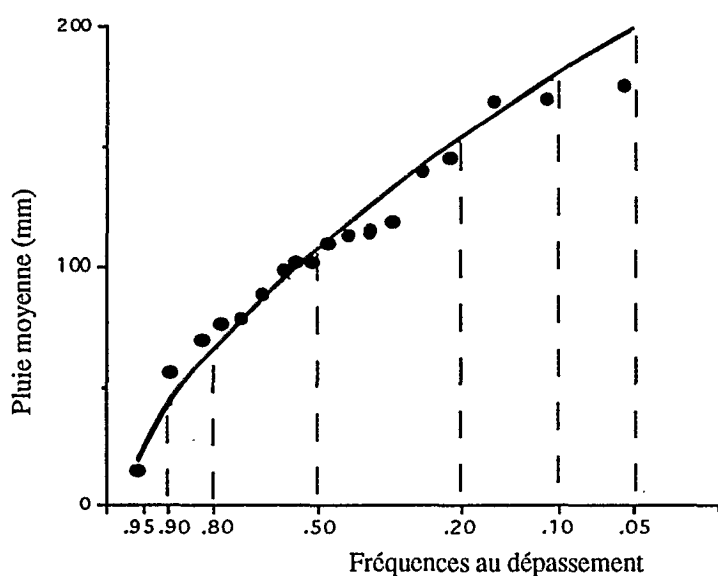


Fig. 3-A.10 Distribution de la pluie moyenne du bassin du Téloua à Azel

Dans la mesure où des valeurs de pluie moyenne et d'écoulement existent sur les bassins leur relation est toujours préférée à la relation générale, ne tenant pas, ou peu, compte des particularismes locaux.

Fréq.dép	0,90		0,50		0,10	
	Pluie moy (mm)	Lame écou (mm)	Pluie moy (mm)	Lame écou (mm)	Pluie moy (mm)	Lame écou (mm)
Azel	44	1,5	110	11	185	42
Timia 1	76	3	100	15	143	75
Timia 2	53	0,1	74	3	101	16
El Méki	40	2	100	15	140	37
Tchirozé	30	2	80	8	120	25

Tab. 3-A.7 Distributions statistiques des pluies moyennes et des lames écoulées des bassins des régions centre et sud-Aïr

b) La région est-Aïr

L'intéressante relation qui lie la pluie moyenne des bassins de la région des Bagzanes à celle du Téloua à Azel (annexe 2-A.III,8) permet de poursuivre le calcul précédent (tab. 3-A.8)

La potentialité du petit bassin de piémont Akrereb est à nouveau mise en valeur, alors que les valeurs à peu près nulles de la fréquence décennale déficitaire soulignent le caractère très sévère des conditions d'écoulement dans ce secteur du massif.

Fréq.dép	0,90		0,50		0,10	
Bassin	Pluie moy (mm)	Lame écoul (mm)	Pluie moy (mm)	Lame écoul (mm)	Pluie moy (mm)	Lame écoul (mm)
Azel	44	1,5	110	11	185	42
Téloues	6	0	47	1,7	129	16,8
Nabarou	16	0,2	59	2,6	150	23,2
Akrereb	0	0	100	15	143	75

Tab. 3-A.8 Distributions statistiques des pluies moyennes et des lames écoulées des bassins de la région est-Aïr

c) La région nord-Aïr

Le principe du calcul reste le même, mais cette fois les pluies moyennes des bassins d'Iférouane ne sont pas rapprochées de celle du Téloua à Azel, mais des pluies d'Iférouane. Les relations, une nouvelle fois excellentes (annexe 2-A.III,9), permettent de déterminer les pluies de fréquences caractéristiques qui, introduites dans la relation lame d'eau écoulée / pluie moyenne de chaque bassin, donnent les lames de fréquences correspondantes (Tableau 3-A.9).

Fréq.dép	0,90		0,50		0,10	
Bassin	Pluie moy (mm)	Lame écoul (mm)	Pluie moy (mm)	Lame écoul (mm)	Pluie moy (mm)	Lame écoul (mm)
Iférouane	19	-	44	-	100	-
Tamgak	36	6,5	48	9,5	113	38
Iberkoum	32	0,4	42	0,6	90	3,6
Ifé S 3,4	31	1,4	42	2,1	102	6,6

Tab. 3-A.9 Distributions statistiques des pluies moyennes et des lames écoulées des bassins de la région nord-Aïr

Les données de ce tableau confirment les observations déjà réalisées sur les bassins d'Iférouane. Le bassin Tamgak (S1) avec ses fortes pentes transversales et longitudinales, ses forts pourcentages d'affleurement du socle, fait preuve d'une forte activité. Le bassin Iberkoum (S2), "empâté" par ses dépôts alluviaux, voit ses capacités, identiques en tête de bassin à celles de Tamgak S1, fortement amoindries à l'exutoire. Un facteur 20 existe en année moyenne entre les écoulements des deux bassins; un facteur dix encore, en année décennale humide.

3) Les écoulements maximum:

a) Les crues annuelles des stations bien observées:

Comme pour les écoulements moyens les valeurs des écoulements maximum annuels peuvent être obtenues directement à partir de la statistique lorsque la période d'observation des

bassins est suffisante (au moins dix ans), comme c'est le cas pour un certain nombre de bassins sud-Aïr liés au Téloua , annexe 3-A.II,2 (tab.3-A.10), dont les valeurs permettent d'estimer la crue décennale. Car les contraintes imposées par la mise en œuvre de l'hydrogramme unitaire se sont révélées rédhitoires.

Fréq. dép	0,95	0,90	0,50	0,10	0,05
Azel	45	55	175	500	640
Dabaga	80	100	223	620	840
Agassaghas	-	1	15	55	-
Azamella	-	0	75	155	-

Tab.3-A.10 Distributions des débits maxima annuels sur le bassin du Téloua

b) Les crues maximales annuelles des autres bassins peu ou pas observés:

Leur détermination est parfois délicate, les causes d'imprécisions et d'erreurs étant nombreuses. Les données de terrain sont toujours utilisées au maximum, car la cote d'un délaissé de crue est toujours préférable pour l'estimation d'un écoulement rare à l'utilisation d'un calcul fondé sur des estimations. Le secours de certaines formules hydrauliques simples, comme celle de Manning-Strickler, est cependant utilisé à l'occasion. Les tableaux qui suivent présentent donc l'état de la connaissance au sujet des crues maximales "ordinaires" ne dépassant généralement pas le niveau d'un événement décennal. Car pour les phénomènes à caractère exceptionnel des choix s'imposent qui font largement intervenir l'appréciation personnelle.

Sur le secteur sud-Aïr en dehors des bassins sur lesquels il a été possible d'effectuer des statistiques, les données disponibles concernent le kori Ouajoud (Ht bassin du Téloua) sur lequel, à partir d'enquêtes de crues, ont été obtenues par Lefèvre (1959,1960) et Roche (1964) les valeurs suivantes:

1959: $Q_{max} = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 1960: $Q_{max} = 135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 1964 : $Q_{max} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

De même sur le bassin du kori Tchirozérine l'hivernage 1973 produit un Q_{max} de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Mais sur ce secteur sud-Aïr, favorable à l'expression hydrologique des bassins, ce sont les données des petits BVR de la région de Razel qui semblent les plus utiles, tab.3-A.11:

Bassins	Superficie km ²	Année	Q max m ³ .s ⁻¹	Pl. jour moy. (mm)	Ke de crue (%)
In Tiziouen 1	1,87	1959	21,0	26	67
		1960	12,7	21	31
In Tiziouen 2	0,67	1959	7,6	28	64
In Azena	2,60	1959	8,6	-	-
		1960	5,2	27	33
Acharak	2,13	1988	21,6	41	71
		1989	27,3	37,7	94
		1990	32	38,5	95

Tab. 3-A.11 Caractéristiques des crues maximales des BVR de Razel

Sur les bassins versants In Tiziouen et In Azena, une évaluation des crues décennales par la méthode de l'hydrogramme unitaire (Lefevre, 1960 et 1961; Billon 1990) a donné les résultats suivants (tab. 3-A.12) (La pluie décennale retenue étant celle de la période la plus favorable à Agadez).

Bassins	P ₁₀ (mm)	Q ₁₀ (m ³ .s-1)	Ke ₁₀ (%)
In Tiziouen 1	53	32	75
In Tiziouen 2	53	25	90
In Azena	53	26	60

Tab. 3-A.12 Caractéristiques des crues décennales des BVR de Razel

P₁₀ : Pluie décennale Q₁₀ : Débit décennal Ke₁₀ : Coef. d'écoul. décennal

Ces données apparaissent relativement modestes, face aux formidables conditions d'écoulement enregistrées à Acharak durant les trois années où ce bassin a été suivi.

On peut vraisemblablement considérer que ce petit bassin rive droite du Téloua constitue une référence pour l'Aïr en matière d'optimum de ruissellement; superficie limitée, appartenance au secteur le plus arrosé du massif, pentes fortes, absence de développements alluviaux.

Sur le secteur centre-Aïr les données du bassin de Timia 1 qui concernent six années ont permis de procéder à une estimation de la crue décennale unitaire (Ben Abdelfadel, 1984) dont la valeur, 420 m³/s, était jusqu'ici considérée comme excessive pour un bassin de 40 km².

Mais la compacité du bassin, la faiblesse de ses développements alluviaux avant la station de contrôle, ses pentes et ses surfaces, l'apparentent assez bien aux conditions privilégiées du BV d'Acharak. Seule la qualité unitaire de l'averse sur une telle superficie pourrait être mise en cause! Les autres bassins de Timia, observés durant deux années seulement, dont les conditions d'écoulement sont autrement dégradées, présentent des valeurs maximales effectivement plus modestes; tab. 3-A.13

Bassins	Superficie (km ²)	Année	Q max m ³ .s ⁻¹	Pl.jour moy. (mm)	Ke de crue (%)
Timia 1	40,3	1976	170	-	-
		1977	110	28,1	61
		1978	58	25,8	25
		1979	145	24,2	27
		1980	205	19,4	25
		1981	49	19,1	31
Timia 2	7,1	1976	10,6	24,0	16
		1977	36,5	17,3	33
Timia 3	63,8	1976	32,8	26,9	6
		1977	0	-	-
Timia 4	156	1976	36	16,6	3
		1977	127	9,8	19

Tab. 3-A.13 Caractéristiques des crues maximales des BV de Timia

Les valeurs obtenues sur le bassin d'El Méki et sur le grand Anou Makaren relèvent d'enquêtes et de calculs estimatifs utilisant la formule de Manning-Strickler (tab.3-A.14)

Année	1958	1959	1960	1964	1974
El Méki 165 km ²	150	80	225	470	157
Anou Makaren	150	8	20	80	-

Tab. 3-A.14 Caractéristiques des crues maximales (en m³.s⁻¹) de la région centre-Aïr

Les valeurs sont élevées sur le bassin d'El Méki dont une bonne partie se situe en milieu d'altitude au pied du mont Todgha (1853 m). L'Anou Makaren affiche des valeurs nettement plus faibles en raison de la superficie de son bassin, qui représente déjà plusieurs centaines de km², et de l'existence de milieux alluviaux.

Dans la région "est" les données sont toujours obtenues à partir des bassins situés sur la bordure sud-est du massif des Bagzanes. Cinq années sont disponibles, dont l'année 1977, qui présente des valeurs particulièrement élevées, sans doute voisines de phénomènes décennaux, (tab.3-A 15)

Bassins	Superficie km ²	Année	Q max m ³ .s ⁻¹	Pl.jour moy. (mm)	Ke de crue (%)
Téloues	324	74	760	39,9	17
		1977	320		
		78	13,4		
		79	27,8		
		80	100		
Nabarou	244	74	146	19,0	21
		1977	165		
		78	39,0		
		79	22,2		
		80	91		
Akredeb	26,4	74	27,0	33,8	80
		1977	270		
		78	32,0		
		79	1,9		
		80	48,7		

Tab. 3-A.15 Caractéristiques des crues maximales enregistrées dans la région est-Aïr

Les valeurs maximales de la région nord-Aïr sont obtenues sur les bassins d'Iférouane. Six années sont disponibles, et des observations faites sur des délaissés de crue à l'installation du BV Tamgak S1 en 1975, montrent que des débits de pointe très élevés (2400 m³.s⁻¹) sont possibles sur ce bassin (tab. 3-A.16). Mais l'amortissement des crues est spectaculaire dans le piémont du massif; des débits de pointe remarquables (1380, 1520 m³.s⁻¹) observés à Tamgak

S1 apparaissent très amoindris à la station Iférouane, où ils ne représentent plus respectivement que 132 et 445 m³.s⁻¹; et ce malgré les apports intermédiaires d'Iberkoum.

Bassins	Superficie km ²	Année	Q max m ³ .s ⁻¹	Pl. jour moy. (mm)	Ke de crue (%)
Tampak S1	620	1975	142	-	-
		76	650	22,6	41
		77	1380	11,7	68
		78	267	9,8	38
		79	93	-	-
		80	1520	-	-
Iberkoum	850	1975	10,5	-	-
		76	46,8	11,2	2
		77	19,7	3,7	11
		78	41,6	5,9	7
		79	8,7	-	-
		80	188	-	-
Iférouane	1550	1975	61,2	-	-
		76	195	15,2	11
		77	132	8,7	15
		78	62	7,6	10
		79	30	-	-
		80	445	-	-

Tab. 3-A.16 Caractéristiques des crues maximales enregistrées dans la région nord-Aïr

c) les crues à caractère exceptionnel:

Leur estimation est évidemment encore plus préoccupante que dans le cas des crues annuelles ou même décennales si un objectif d'aménagement est en vue.

Les plus forts écoulements résultant en principe des plus fortes pluies, le problème se résume à déterminer qu'elle sera la réaction des différents types de bassin aux averses rares dont on connaît à Agadez et Iférouane la distribution statistique (cf chap.2-A.III,5). Deux étapes sont nécessaires pour parvenir à cet objectif:

Il est d'abord indispensable d'établir la relation qui lie cette pluie ponctuelle rare à la pluie moyenne sur le bassin (ce qui revient à appliquer un coefficient d'abattement).

Il faut ensuite appréhender la réaction du bassin à cette pluie moyenne de fréquence rare.

Partant de l'abondante documentation ORSTOM des rapports de campagnes hydrologiques (Lefevre, 1960, 1961; Roche, 1964; Hœpffner et al, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980; Billon et al, 1981, 1982, 1983; Bouvier et al, 1982; Bricquet et al, 1984, 1985; Ben Abdelfadel, 1984; Amri et al, 1986; Gallaire et al, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990) dont les principaux résultats sont rappelés dans les annexes 3-A.I,1 à 36, les deux relations $P_{moy} = f(P_{max})$ et $Q_{max} = f(P_{moy})$ ont été recherchées sur les bassins, par secteur, pour les événements pluie-écoulement les plus importants. Le tableau 3-A.17 présente les relations mises en évidence par cette prospection. Les liaisons établies à partir de dix à vingt couples de valeurs

sont, pour la plupart, linéaires et de bonne qualité. C'est sur les petits bassins représentatifs, comme Acharak (fig.3-A.11), que les résultats sont les meilleurs et les plus fiables.

BASSIN	P moy = f (P max)	Q max = f (P moy)
Tamgak S1	$P \text{ moy} = 0,22 P \text{ max} + 11,7$ $r = 0,83$	$Q \text{ max} = 52,5 P \text{ moy} - 264$ $r = 0,79$
Iberkoum S2	$P \text{ moy} = 0,24 P \text{ max} + 4,6$ $r = 0,98$	$Q \text{ max} = 8,87 P \text{ moy} - 28$ $r = 0,79$
Timia S1	$P \text{ moy} = 0,412 P \text{ max} + 8,34$	$Q \text{ max} = 16,89 P \text{ moy} - 249$ $r = 0,69$
Tabelot (Téloues-Nabarou)	$P \text{ moy} = 0,262 P \text{ max} + 16$ $r = 0,85$	$Q_m = 0,42 (P_{\text{moy}})^2 - 12,6 P_{\text{moy}} + 110$ $r = 0,94$
Tabelot (Akrereb)	$P \text{ moy} = 0,601 P \text{ max} - 6,52$ $r = 0,90$	$Q \text{ max} = 2 P \text{ moy} - 3,8$ $r = 0,90$
Acharak	$P \text{ moy} = 0,90 P \text{ max} - 1,15$ $r = 0,99$	$Q \text{ max} = 0,94 P \text{ moy} - 6$ $r = 0,98$
Agassaghas	$P \text{ moy} = 0,715 P \text{ max} - 2,75$ $r = 0,80$	$Q \text{ max} = 1,88 P \text{ moy} - 24$ $r = 0,89$
Azamella	$P \text{ moy} = 0,468 P \text{ max} + 5,50$	$Q \text{ max} = 3,485 P \text{ moy} - 6,46$ $r = 0,81$

Tab. 3-A.17 Relations Pluies max / Pluies moy / Q max des bassins de l'Aïr

Quelques couples de données, manifestement hors normes, ont dû être écartés. Une liaison parabolique a été retenue et bien que les valeurs, en dessous d'un certain seuil, évoluent de façon incohérente, puisque l'on ne s'intéresse dans l'opération, qu'aux valeurs les plus fortes.

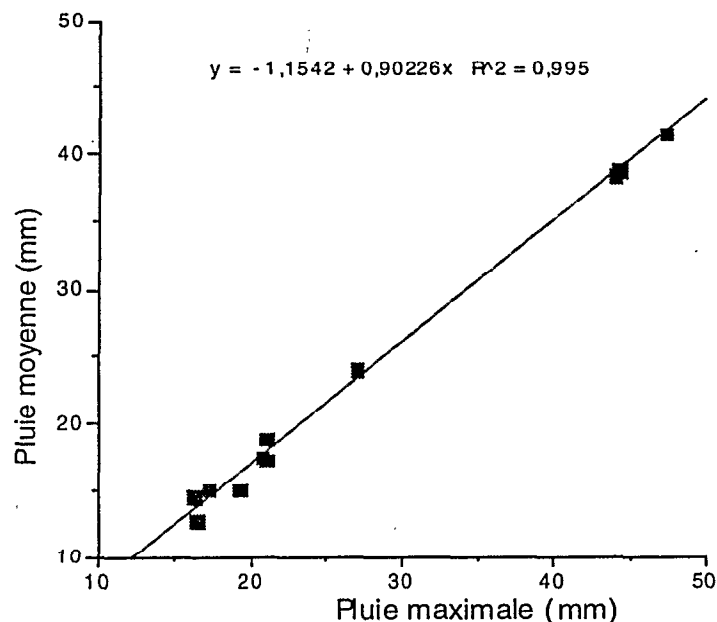


Fig.3-A.11 Relation pluies moyennes / pluies maximales sur le bassin d'Acharak entre 1988 et 1990

Introduisant dans ces relations les valeurs de pluies extrêmes, statistiquement définies au chapitre 2-A.III,5, une valeur d'écoulement correspondant aux fréquences rares est proposée pour les petites unités et par secteur, tab 3-A.18:

Pour les secteurs sud, est et centre Aïr les valeurs des pluies de fréquences rares d'Agadez ont été utilisées, en raison de la proximité des bassins et de la liaison préférentielle mise en évidence précédemment entre les pluies moyennes de la région et celles du Téloua.

Secteur	Bassin \ fréquences	0,5	0,10	0,05	0,02	0,01
Sud-Aïr	BVR \ reg type Agassaghas (5,8)	22	49	63	82	99
	BVR intérieur type Acharak (2,1)	25	43	51	63	73
	Bassin moyen type Azamella (61)	78	108	124	148	168
	Grd bas.peu dégr.(Dabaga; 1040)	225	620	820		≈ 1500
	Grd bassin dégr. (Azal; 1360)	175	500	650		≈ 1000
Centre Aïr	Pt bassin d'altitude (Timia S1; 40)	155	300	370	470	550
	Grd bas.dégr.int.(Anou Makaren)	30				≈ 150
Est Aïr	Pt bas. non dégradé (Akrereb; 26)	29	54	65	83	97
	Bas. mixt (Téloues/Nabarou; 324)	68	132	170	238	303
Nord Aïr	Grd bas. non dégr.(Tamgak; 620)	560	700	780	900	1000
	Grd bassin dégr.(Iberkoum; 850)	50	80	92	110	130
(5,8): superficie en km ² ;		≈ : valeur estimée, non calculée;				

Tab. 3-A.18 Débits caractéristiques des plus forts écoulements de l'Aïr

Pour le secteur nord-Aïr, ce sont les valeurs statistiques des pluies d'Iférouane qui ont été retenues pour le calcul. Dans cette région difficile d'accès, aux grands bassins de plusieurs centaines de km², le contrôle de la pluie n'a pu s'effectuer à l'évènement, comme ailleurs, mais à des pas de temps décadaire ou mensuel. L'appréciation de la liaison pluie moyenne - pluie maximale des bassins a été de ce fait plus délicate; l'estimation de l'abattement (Vuillaume, 1974) à partir de valeurs de pluies cumulées risquant d'altérer la qualité de la liaison et de fragiliser le calcul d'estimation des débits de pointe.

Les résultats obtenus tant sur Tamgak S1 que sur Iberkoum S2 apparaissent cohérents, tout au moins pour les valeurs moyennes. Elles sont peut-être, pour les fréquences rares, sousestimées à Tamgak S1, où des délaissés de crue auraient montré l'existence d'écoulements approchant 2500 m³/s. Sur ce bassin de plus de 600 km², les valeurs d'écoulements maximum apparaissent pourtant déjà remarquables, surtout si on les compare à celles du bassin voisin Iberkoum. Ce dernier, sur une superficie à peine supérieure, présente en effet des valeurs dix fois moins importantes.

CONCLUSION:

Cette différence entre les deux bassins illustre bien les conditions générales d'écoulement que l'on retrouve partout dans l'Aïr:

Dès que des dépôts alluviaux peuvent se constituer, du creux des moindres talwegs au fond des vallées les plus importantes, les écoulements sont altérés. Le phénomène est observé

tant sur Azamella, 61km², que sur Iberkoum, 850 km².

Lorsque ces dépôts sont absents, la potentialité des écoulements est toujours élevée, même sur des grands bassins comme Tamgak.

A la périphérie du massif, la dégradation des conditions d'écoulement s'accélère en se diversifiant. Aux prélèvements par la masse alluviale croissante des lits qui se développent latéralement et en profondeur, s'ajoutent les diffluences résultant de l'envahissement des cônes de déjection. L'apparition de surfaces subhorizontales imperméables (régosols) favorise d'autre part la désorganisation du ruissellement, qui s'effectue le plus souvent en nappe, et qui est soumis à une forte reprise évaporatoire; contrairement aux eaux intérieures du massif.

B. LES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION

I. LES MESURES ANTECEDENTES:

Les observations ont commencé dans l'Aïr en 1959, à Razel Mamoulmi, sur le Téloua (Lefèvre, 1960). Au nombre d'une vingtaine durant la saison des pluies, les mesures n'ont été que ponctuelles (pas de suivi en cours d'écoulement), et en grande partie menées sur des eaux de décrue ou de tarissement. Elles ne représentent qu'un intérêt relatif tant pour les concentrations que pour les masses transportées; mais l'existence de points de mesure sur la largeur à un instant donné permet de vérifier l'homogénéité du phénomène de surface dans la section, tableau 1 et 2 de l'annexe 3-B.I,1.

En 1974 et 1975, la société ELECTROBEL qui étudie le kori El Méki dans le cadre d'un projet de retenue relève, pour ces années là, un flux de matière en suspension remarquablement constant par rapport au volume écoulé:

85500 tonnes pour un volume écoulé de $9,1.10^6$ m³ en 1974

85000 tonnes pour un volume écoulé de $9,5.10^6$ m³ en 1975

En 1985 et 86, le bassin "élèves", installé à Azel sur 0,3 km², sert de laboratoire expérimental pour l'étude de l'érosion sur "reg" (Giazzi, 1990; Ben Salah, Ntonga, 1986). La dégradation spécifique de ce micro bassin apparaîtra tout à fait comparable à celle du grand bassin du Téloua (1360 km²) à Azel pour la même période, et aux mesures réalisées sur le bassin d'Agassaghas au début des années 80 (Valentin, 1985), grâce au mini simulateur de pluie (tableaux a et b de l'annexe 3-B.I,2). A la même époque, dans le cadre d'une étude pour l'aménagement des vallées de l'Aïr, Giazzi (1990) effectue des mesures de transports sur les événements les plus marquants du Téloua à Azel (tableaux a et b des annexes 3-B.I,2 et 3).

La mesure systématique du transport de matières en suspension sur le Téloua ne commencera qu'en 1987. Elle se poursuivra jusqu'à la fin des observations hydrologiques ORSTOM, en 1990, permettant de réunir, avec les données recueillies par F. Giazzi, une chronique de six années (tableaux a et b des annexes 3-B.I,3 et 3-B.III,1 et 2) à peu près complètes sur les flux de matières et la dégradation spécifique du bassin versant. L'étude

granulométrique des prélèvements de deux écoulements de potentialités très différentes (faible en 89, forte en 88) permettra de déterminer le type de matériaux transportés et l'évolution de ce transport en cours de crue.

II. PRINCIPE ET CONDITIONS DE LA MESURE SUR LE TELOUA

Le principe de la mesure désormais bien connu à l'ORSTOM sur les divers types de cours d'eau intertropicaux (Billon, 1968; Nouvelot, 1969; Chouret, 1975; Olivry, 1977; Brunet-Moret et al, 1986; Gallaire, 1995...) et les conditions particulières d'étude sur le kori Téloua, aux écoulements à caractère proche de ceux des oueds maghrébins, sont exposés dans l'annexe 3-B.II,1.

III. LES RESULTATS SUR LE BASSIN DU KORI TELOUA

1) Les concentrations:

a) Les données acquises avant 1980:

Les concentrations obtenues par Lefèvre en 1959 (tab.2 annexe 3-B.I,1) à Razel, pour la plupart inférieures à 1 g.l^{-1} , ne sont que le reflet de phénomènes de décrue et de surface. Les trois valeurs de concentration obtenues en phase ascendante, sans autre précision que le débit de prélèvement (aucune indication sur la durée, l'importance de la crue, la situation de la prise d'échantillon) restent modestement inférieures à 2 g.l^{-1} .

Ces observations présentent néanmoins un intérêt dans la mesure où, à un même moment de la crue (même débit), plusieurs prises ont été effectuées sur la largeur du cours d'eau, permettant de contrôler la variabilité du transport de surface sur cette section de 170 mètres de large:

En phase de crue il semble qu'une différence de concentration de l'ordre de 20 % existe entre 10 et 30 mètres de la rive. Mais cette différence, entre deux points seulement, et sur une partie relativement modeste de la section, n'a pu être confirmée par une autre série de mesures.

Les autres séries de prélèvements ont toutes été effectuées en phase de décrue. Celle relative à des débits de $13,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ présente les écarts de concentration les plus importants: A cinq mètres de la berge la concentration ($0,75 \text{ g.l}^{-1}$) légèrement supérieure à celle enregistrée à 20 m ($0,68 \text{ g.l}^{-1}$) peut s'expliquer par l'existence de phénomènes d'arrachement. Par la suite l'augmentation régulière et plus sensible des valeurs, jusqu'à $1,13 \text{ g.l}^{-1}$ à 60 m, semble pouvoir être le signe de concentrations plus élevées dans la zone médiane de l'écoulement.

Malheureusement, les séries de prélèvements correspondant aux débits $16 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ne présentent aucune différence notable sur le développement de la section, voir même à contrario une valeur plus faible de berge pour l'observation $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Ces premières mesures de transport en suspension sur le Téloua (Lefèvre, 1960) ne permettent donc pas d'apporter la preuve d'une différenciation des concentrations de surface liée à la position dans la section. D'autre part, si aucune expérimentation n'a été menée, qui mette en évidence une évolution verticale du transport, il est vraisemblable qu'en dehors des phénomènes de charriage de fond (saltation, roulage, glissement), dont l'existence ne peut être ignorée, compte tenu de la morphologie très régulière du lit du Téloua (grande largeur par rapport à la profondeur; rayon hydraulique \approx profondeur moyenne), le transport en suspension dans ce Kori, comme dans les autres koris du massif, présente une certaine homogénéité.

b) Les données acquises entre 1980 et 1983 (tab.1 annexe 3-B.I,1)

Elles concernent quelques prélèvements ponctuels effectués de façon non coordonnée aux trois stations hydrologiques du Téloua (Dabaga, Razel, Azel), en crue comme en décrue, sur des écoulements de toutes importances (de 6 à 565 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), Billon et al., 1980, 1981, 1982; Bricquet et al., 1984.

Les concentrations, en moyenne beaucoup plus élevées que celles enregistrées en 1959, sont liées à des débits plus importants, mais aussi et surtout, à des phases ascendantes de crue.

A Dabaga les concentrations des débits de pointe de deux fortes crues (565, 555 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) apparaissent bien modestes (10 à 12 g.l^{-1}) en regard des concentrations d'autres débits de crues moyennes (7,43 g.l^{-1} pour 146 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) ou faibles (3,56 g.l^{-1} pour 19,7 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

Il est vraisemblable que les concentrations des deux plus fortes crues aient été, en phase ascendante, beaucoup plus élevées; et que les concentrations des débits de pointe aient relevé déjà d'importants phénomènes de dilution de la suspension.

A Razel, les mesures, peu nombreuses, sont cohérentes avec celles de Dabaga.

A Azel, les prélèvements effectués en cours de montée des crues confirment les hypothèses émises précédemment. Des débits relativement faibles (15 à 40 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), mais croissants, sont susceptibles de produire des concentrations de 20 à 35 g.l^{-1} .

c) Les données acquises à partir de 1985: (Gallaire et al., 1986 à 1990)

Elles concernent le bassin "élèves" (tab. a et b de l'annexe 3-B.I,2) et le début du suivi de l'intégralité des écoulements annuels du Téloua à Azel (tab. a et b de l'annexe 3-B.I,3).

Les concentrations maximales observées à l'exutoire du petit bassin expérimental sur reg de 0,3 km^2 , correspondent, en valeurs et en dispersion, à celles observées à Azel: les concentrations s'échelonnent de 2,3 à 16,5 g.l^{-1} sans liaison significative avec des débits de 0,12 à 1,6 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

Les concentrations du Téloua sont observées à Azel sur 64 crues de 1985 à 1990. Les concentrations maximales varient de 1,32 g.l^{-1} , pour une très petite crue de septembre 1990, à la valeur record (114 g.l^{-1}) d'une crue d'août 1987, qui est loin de présenter un caractère exceptionnel ($Q_{\text{max}} = 28 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), mais dont le temps de montée (6 mn) a été particulièrement bref.

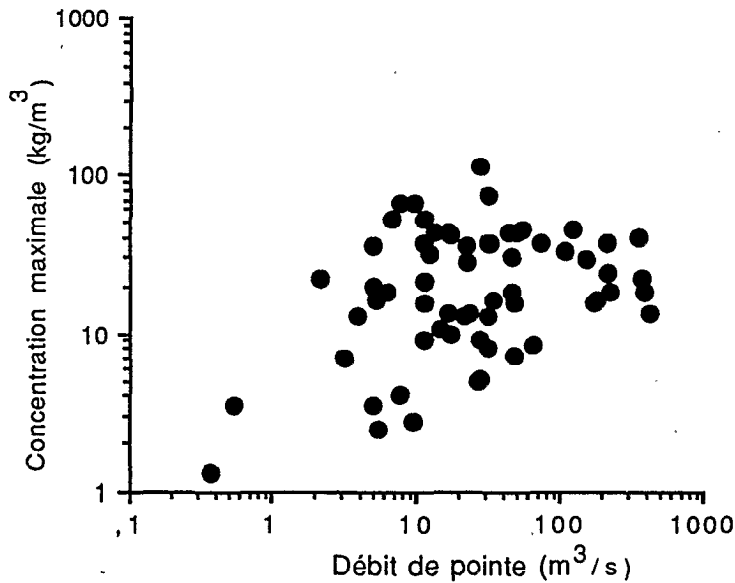


Fig. 3-B.1 Concentrations maximales des suspensions à AZEL en fonction des débits de pointe

L'absence de liaison significative concentration-débit de pointe est soulignée par la fig. 3-B.1.

2) Les matériaux transportés:

L'étude granulométrique fine des prélèvements, de deux crues de taille différente à Azel, a permis de déterminer les types de matériaux transportés ainsi que leur l'évolution au cours de l'écoulement. La crue du 13/8/89 est modeste ($Q_{max}: 22,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et amortie après un transit d'une dizaine d'heures depuis le haut Téloua (arrivée à Azel à 3 heures du matin)

a) Les matériaux en suspension de la petite crue du 13/8/89: (fig. 3-B.2)

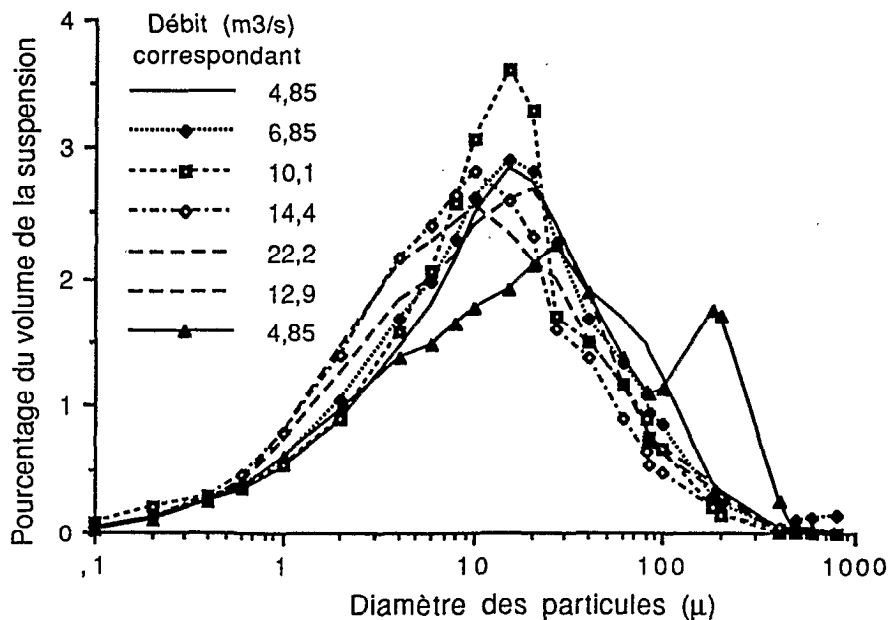


Fig. 3-B.2 Granulométrie des suspensions de la crue du 13/8/89 à Azel

Les courbes de distribution des volumes en fonction du diamètre des particules sont, sauf pour la dernière correspondant à un débit de tarissement, monomodales et symétriques par rapport à une valeur centrale de 12 à 15 μ .

Le sédiment transporté en suspension appartient donc, en grande partie, aux limons fins à grossiers. L'allure surprenante de la courbe granulométrique bimodale de fin d'écoulement (4,85 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) qui inclut des sables, à un moment où la capacité de transport du kori est supposée être en nette régression, s'explique par la prise en compte, lors du prélèvement dans une lame d'eau de moins de vingt centimètres d'épaisseur, d'une partie du transport de fond.

Cette observation vient confirmer la théorie (II,1,a) selon laquelle le transport de fond serait peu dépendant de l'hydraulicité.

Bien que présentant une belle homogénéité d'ensemble les courbes successives montrent un glissement réfléchi qui permet de suivre l'évolution de la capacité de transport des eaux de la crue:

- La première courbe, qui correspond à un débit encore modeste de 4,85 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, présente une dissymétrie liée à une présence d'éléments sableux dont l'existence ne peut s'expliquer, à ce stade de l'écoulement, que par le pouvoir d'arrachement et d'entraînement supérieur, généré par l'augmentation de pente hydraulique, caractéristique des phénomènes de montée de crue des oueds.

- Cette dissymétrie disparaît rapidement en cours de montée, en même temps que le transport s'homogénéise (rétrécissement et étirement de la partie supérieure de la courbe)

- L'approche de la pointe de crue est marquée simultanément par un tassement des courbes, une translation, et l'apparition d'une dissymétrie vers les éléments fins.

- La décrue marquée par un nouveau glissement vers les éléments moins fins, commence sans doute à inclure les éléments les plus fins du transport de fond.

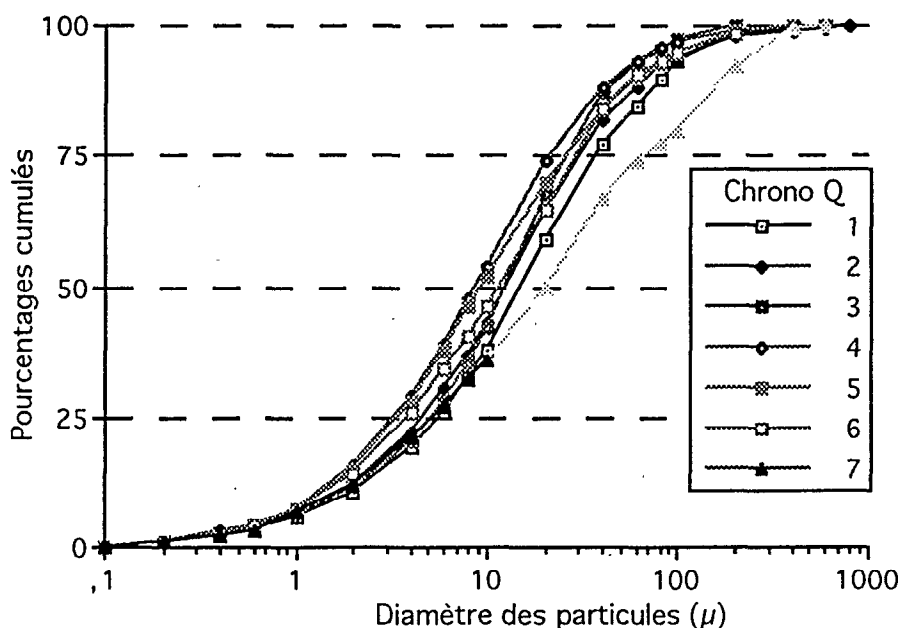


Fig. 3-B.3 Granulométries cumulées de la crue du 13/8/89

La courbe des pourcentages cumulés qui précède (fig.3-B.3) montre également l'évolution du transport en cours de crue; mais elle permet surtout d'apprécier la part relative, à chaque instant de la crue, des différents types d'éléments:

Les argiles représentent, comme les sables à l'autre extrémité de la courbe, 12 à 15 % de la suspension. Les deux tiers des particules se situent en dessous du seuil des limons grossiers (20 μ), 50 % représentent donc des limons fins.

Seules, les deux dernières courbes cumulées de décrue (6 et 7 dans l'ordre chronologique des débits) s'écartent sensiblement du faisceau en raison de la prise en compte des particules du transport de fond.

Suivant la courbe "7", qui marque la dérive la plus importante, 25 % des éléments sont des limons grossiers et 25 % des sables. L'importance des limons grossiers est donc en augmentation de 50 %, celle des sables de 100 %.

b) Les matériaux en suspension de la crue du 23/8/88 (fig.3-B.4)

Cette crue importante ($Q_{max} > 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) arrive à Azel peu après 19 heures, après trois à quatre heures d'écoulement depuis le bassin intermédiaire (région de Dabaga à Razel).

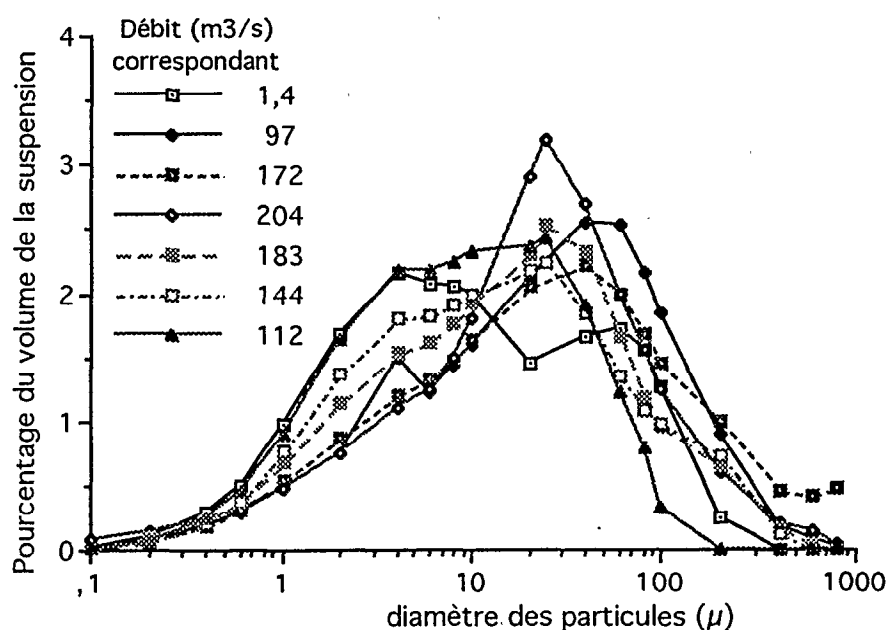


Fig. 3-B.4 Granulométrie des suspensions à Azel au cours de la crue du 23/8/88

A part la courbe correspondant au plus fort débit ($204 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) la tendance des autres courbes est bimodale. La répartition granulométrique apparaît de ce fait plus étalée que la précédente; le décalage du mode principal vers des diamètres plus importants (30 μ) souligne une capacité de transport accrue (la courbe correspondant au débit " $172 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ", qui précède le débit de pointe, montre l'existence d'un transport de particules proche du millimètre).

L'affirmation d'un mode secondaire inférieur, à peine esquissé dans la crue du 13/8/89, est le signal d'un lessivage beaucoup plus large du bassin.

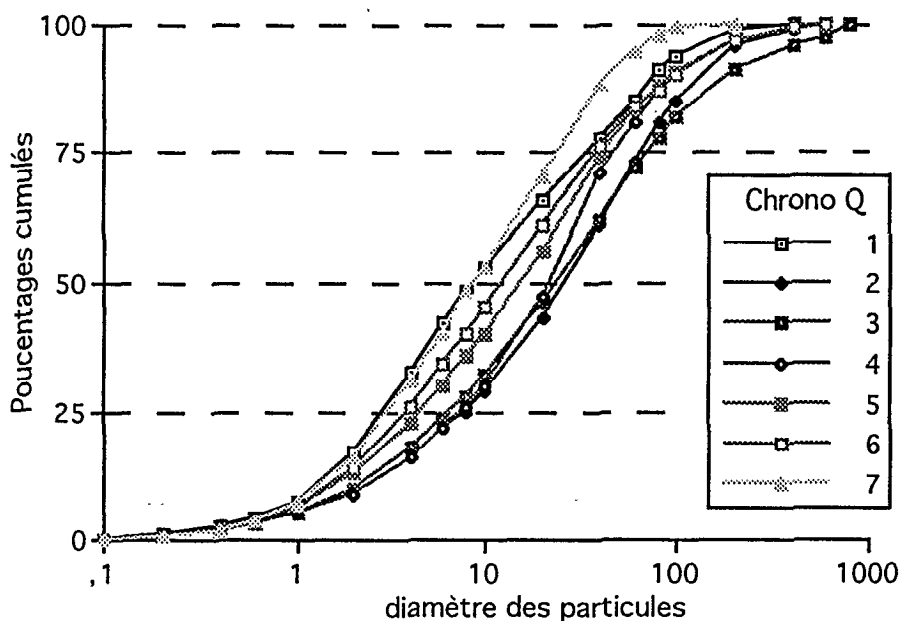


Fig. 3-B.5 Granulométries cumulées de la crue du 23/8/88

Les courbes granulométriques cumulées confirment ces remarques (fig.3-B.5)

Le faisceau des courbes apparaît beaucoup plus "ventru" pour 90 % des volumes (étalement de la distribution des particules), et légèrement décalé vers les diamètres supérieurs (augmentation de la capacité de transport de cette crue).

3) Les débits solides: (tab. des annexes 3-B.I,2 et 3; des annexes 3-B.III,1 et 2)

Dépendant à la fois des concentrations et des débits liquides, les débits solides sont susceptibles d'atteindre, sur le Téloua, des masses instantanées de plusieurs tonnes. Le record des six années d'étude est observé au cours de la crue du 23-24 juillet 1990 avec 6,9 tonnes par seconde pour une concentration de près de 34 g.l⁻¹ et un débit de 204 m³.s⁻¹

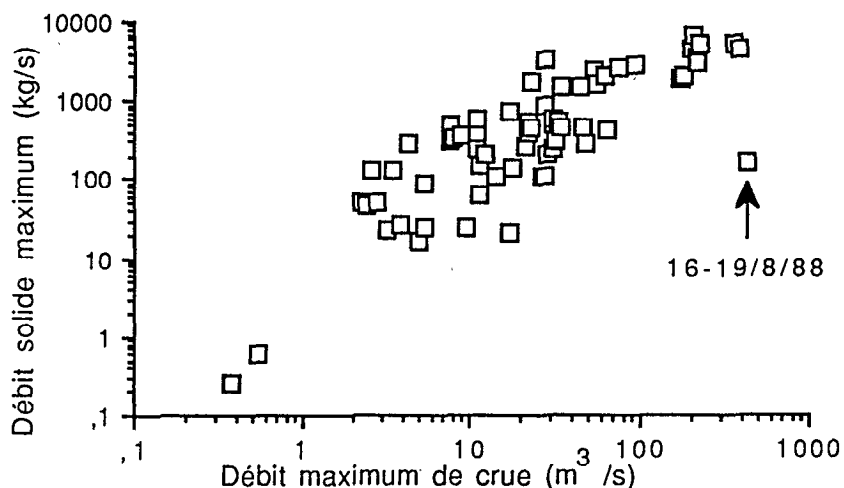


Fig.3-B.6 Débits solides maxima en fonction des débits de pointe de crue.

Les concentrations maximales précèdent généralement les débits de pointe, mais ces

derniers compensent plus ou moins la baisse des concentrations.

Une relation se dégage entre les débits solides maxima et les débits de pointe de crue (fig. 3-B.6), comme avec les volumes de ces crues (fig.3-B.7). Le point fléché de la figure 3-B.6 représente le débit solide maximum de l'importante crue du 16 au 19 août 1988 qui survient immédiatement derrière celle du 14 au 16. Le produit des lessivages du deuxième événement apparaît beaucoup plus limité.

Les figures 3-B.8 et 3-B.9 présentent simultanément hydrogramme et turbidigramme (dont la valeur de matière organique) des deux crues de 1988 et 1989. Elles permettent de comparer l'évolution des deux types de débits (liquide et solide) sur des événements dont l'importance varie d'un facteur dix:

Dans le cas de la petite crue du 13/8/89, (fig.3-B.8), les débits solides précèdent les débits liquides. Ils apparaissent donc, et avant tout, liés aux concentrations supérieures de début d'écoulement résultant de ruissellements et de lessivages sur le bassin. Et si l'arrivée des débits liquides de pointe fournit un léger soutien au flux de matières en suspension, la décroissance du débit solide est beaucoup plus rapide à la décrue que celle du flux liquide; un facteur dix sépare les rapports des débits de pointe et de fin d'écoulement respectifs.

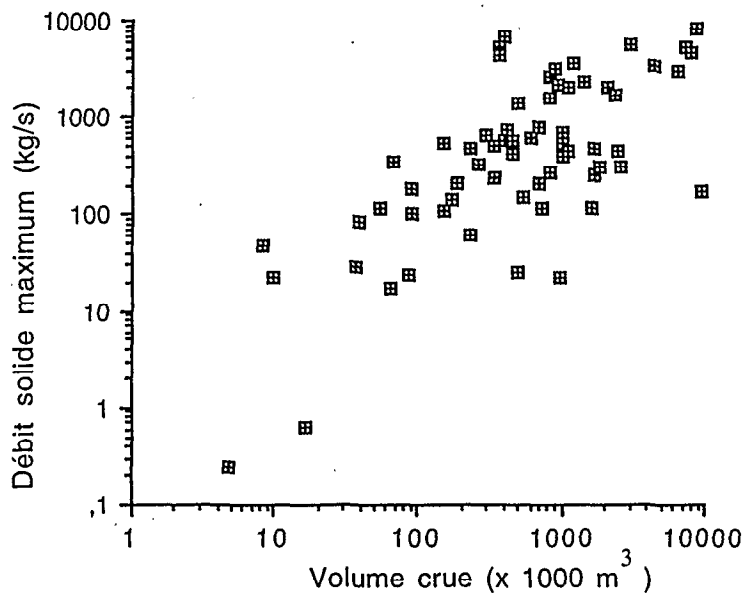


Fig. 3-B.7 Débit solide de pointe en fonction du volume écoulé de la crue

La matière organique, qui relève essentiellement dans la suspension de phénomènes de surface, se présente sous forme de débris végétaux de toutes sortes, et d'excréments caprins et ovins.

La nature même de cette matière organique souligne son origine; le lessivage en début de crue des berges et des lits. Elle participe modestement, en début d'écoulement, au transport en suspension à raison de $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, puis disparaît très rapidement, et presque complètement, bien avant les débits de pointes, qu'ils soient solides ou liquides.

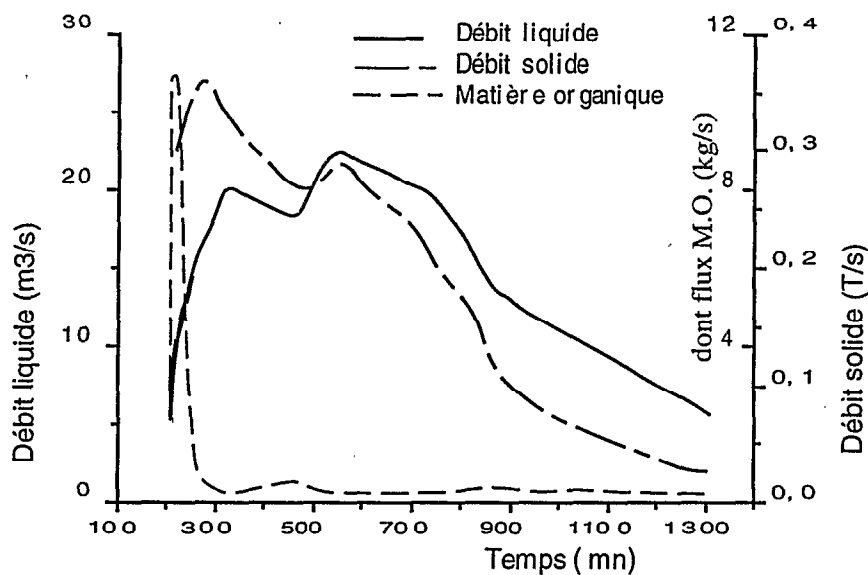


Figure 3-B.8 Flux liquide et solide, matière organique du Téloua à AZEL; crue du 13/8/89

Dans le cas de l'importante crue du 23/8/88, (fig. 3-B.9), les débits solides sont beaucoup plus influencés, dès le début de la montée des eaux, par l'importance des écoulements. Les maxima liquides et solides surviennent simultanément, à peine précédés par le débit des matières organiques dont l'importance relative apparaît quatre fois moindre en raison de l'importance des écoulements ($\approx 250 \text{ g.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$).

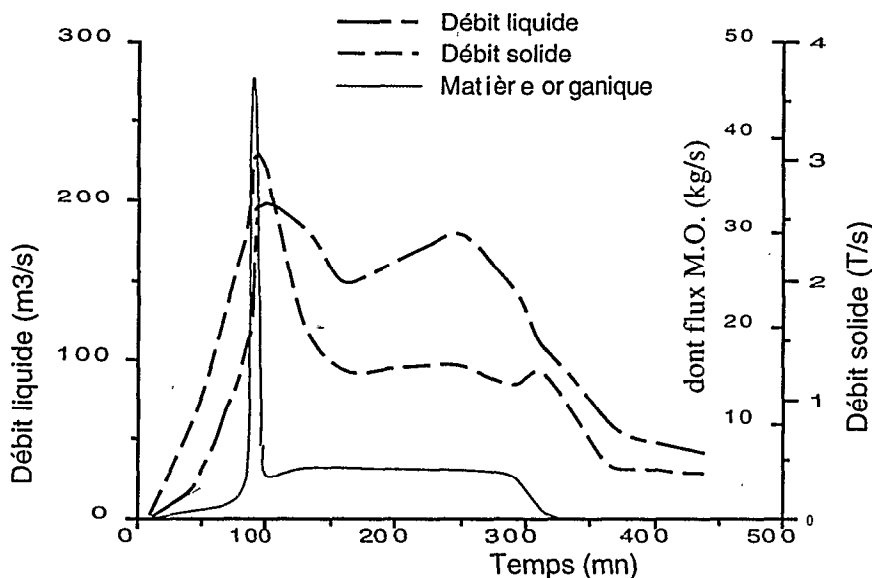


Figure 3-B.9 Flux liquide et solide, matière organique du Téloua à AZEL; crue du 23/8/88

Le rapport des débits de pointe solide / liquide est à peine inférieur à celui de la crue précédente: $0,37 \text{ T.s}^{-1}$ pour $20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ le 13/8/89, 3 T.s^{-1} pour $200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ le 23/8/8, en raison du soutien des débits liquides qui se maintiennent plusieurs heures à $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Le flux de matière organique conserve de même, durant plusieurs heures, un niveau mesurable.

4) Les flux de matières transportées (Tab.des annexes 3-B.I,3 et 3-B.III,1 et 2)

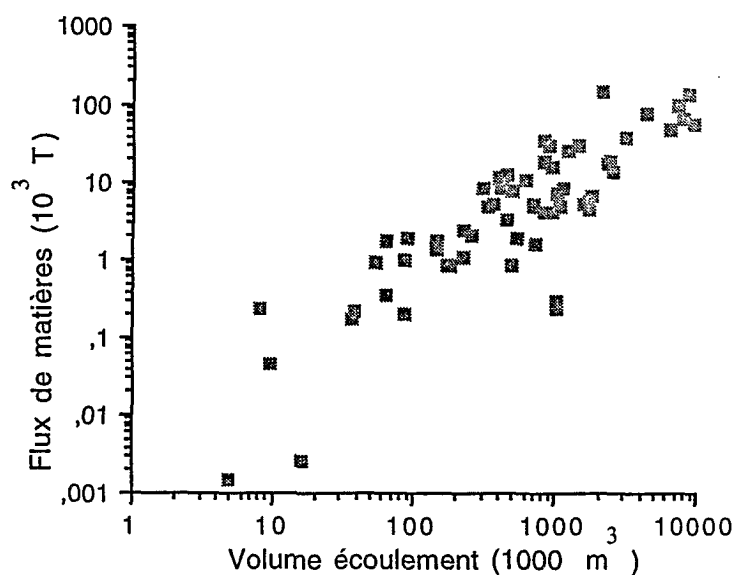


Fig.3-B.10 Flux de matières transportées en fonction du volume des crues à Azel

Résultat de l'intégration dans le temps, comme les volumes écoulés, des débits solides; les flux de matières dépendent à la fois de l'importance des débits solides et de l'extension de la crue; d'où la relation liant les flux de matières et le volume des crues (fig.3-B.10); d'où la relation annuelle (fig.3-B.11) de type logarithmique, à laquelle la seule valeur fiable de l'Air extérieure au Téloua, celle d'El Méki en 1975, s'intègre assez bien:

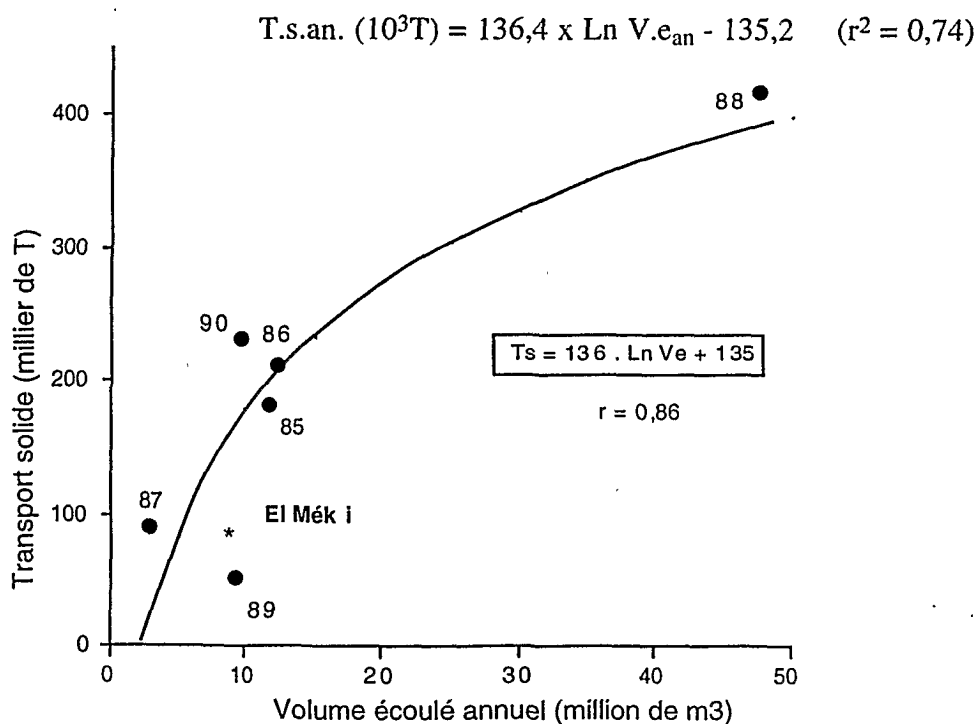


Fig. 3-B.11 Relation annuelle entre le transport en suspension, et le volume écoulé du Téloua à AZEL

Le tonnage le plus important enregistré à Azel (151200 tonnes) correspond à la crue du

31 juillet au 3 août 1990, dont le débit de pointe, $179 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ne la fait appartenir qu'aux crues de moyenne importance du Téloua; mais dont la durée d'écoulement atteint 72 heures. La valeur élevée du transport solide de l'année 1988 (416 000 tonnes) correspond aussi à un volume écoulé record de près de 48 millions de m^3 (le volume écoulé moyen annuel du Téloua à Azel n'étant que de 20 millions de m^3).

5) La dégradation spécifique du bassin: (Tab. annexes 3-B.I,2, 3 et 3-B.III,1, 2)

Le flux annuel de matière, rapporté à la surface du bassin, permet d'apprécier la dégradation spécifique dont il est l'objet.

La dégradation maximale est enregistrée en 1988 ($306 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$) en relation avec les très importants volumes écoulés (48 millions de m^3). La dégradation minimale ($37,6 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$) de 1989 ne correspond pas à l'hydraulicité (9,6 millions de m^3) de cette année là, surtout si on la compare à la valeur de 1987 ($65,5 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$) obtenue à partir de seulement 2,7 millions de m^3 .

L'intérêt de l'expression du transport en terme de dégradation spécifique est de permettre des comparaisons. Dans l'Aïr, seul le bassin d'El Méki (165 km^2) est en mesure de fournir une valeur de dégradation pour 1975 ($515 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$) qui apparaît très élevée malgré l'importance du volume écoulé ($9,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Cette année là, les observations hydrologiques en continu, qui se poursuivront jusqu'en 1990, commencent seulement sur le Téloua; et aucune mesure de transport ne sera effectuée. On dispose cependant du volume écoulé sur le bassin du Téloua à Azel: $1,97 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Partant de la relation liant, sur le Téloua, la masse transportée et le volume annuel, il est possible d'estimer ce qu'aurait pu être, en 1975, le transport solide à Azel; environ $41 \cdot 10^3 \text{ T}$, et par conséquent la dégradation spécifique $\approx 30 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$.

Outre l'effet d'amortissement constaté sur le Téloua, représentatif des grands bassins de l'Aïr, la forte valeur enregistrée à El Méki montre que sur les petits bassins d'altitude, aux pentes fortes ($>$ à 4 % en moyenne à El Méki) le phénomène d'érosion est très actif encore actuellement. Mais si, localement, le creusement de talwegs ou l'accumulation de cônes de déjection donnent au phénomène d'érosion un aspect spectaculaire, l'effet d'ensemble est beaucoup moins visible à l'échelle annuelle:

Ainsi, si on admet que la densité moyenne des matériaux détritiques d'origine métamorphique est de l'ordre de 2,7 (à l'image de celle des minéraux constituants), les 85000 tonnes d'El Méki en 1975 ne représentent jamais qu'un prélèvement moyen de 0,2 mm sur ce bassin de 165 km^2 .

Le petit bassin "élèves" présente pour 1985 et 1986 (annexe 3-B.I,2) des valeurs de dégradation qui sont révélatrices, à la fois, de l'effet de massif sur les événements hydrologiques, et de l'importance de la dégradation des surfaces, apparemment plus fragiles, de la périphérie de l'Aïr. Les dégradations spécifiques obtenues sur $0,3 \text{ km}^2$ (117 et $188 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$), en bordure du massif, sont comparables à celles relevées sur le bassin du Téloua à Azel (135 et $155 \text{ T} \cdot \text{km}^{-2}$), pour deux fois moins d'évènements en 1985 et près de cinq fois moins en 1986.

Si la compacité, la pente moyenne, la proximité de l'exutoire, créent sur une partie du bassin "élèves" des conditions optimales de mobilisation et de transport, ce bassin n'en apparaît pas moins révélateur d'une sensibilité à l'érosion, plus grande qu'à l'intérieur du massif, des types de sols détritiques de la périphérie .

Les quelques études granulométriques menées sur les transports de ce petit bassin expérimental (Giazzi 1990) montrent en effet une plus grande proportion de matériaux grossiers (sables et limons grossiers) que sur le bassin du Téloua.

Cet auteur essaie également de corrélérer les masses transportées des crues observées avec les facteurs susceptibles de les influencer:

Volume écoulé par la crue,
Pluie moyenne sur le bassin,
Intensité maximale de la pluie de l'évènement,
Débit maximum atteint par la crue,

Toutes les relations sont significatives; mais deux se dégagent plus particulièrement:

L'une, linéaire, fait intervenir le volume écoulé par les crues:

$$T_s \text{ (Tonnes)} = 7 V_e (10^3 \text{ m}^3) - 1325$$

L'autre, de type puissance, utilise la pluie moyenne en mm:

$$T_s \text{ (Tonnes)} = 0,01 P_{\text{moy}}^{2,62}$$

CONCLUSION:

Il apparaît donc, à travers toutes ces données sur les transports solides en suspension de l'Air, que ce massif soit encore, et malgré la diminution du volume des pluies liée au phénomène de sécheresse, soumis à d'importants prélèvements de matières, comme le montrent les dégradations spécifiques annuelles de plusieurs centaines de tonnes par km².

Le transport des crues est particulièrement homogène; la granulométrie des suspensions est essentiellement limoneuse. Mais l'existence d'un charriage de fond plus grossier (sables), relativement indépendant de l'hydraulicité, et qui représente dans la plupart des cas un transport aussi important que la suspension, ne doit pas être ignorée.

La capacité de transport des koris est partout importante à l'intérieur du massif, en relation surtout avec les pentes. Les concentrations en cours d'écoulement atteignent couramment plusieurs dizaines de grammes par litre; occasionnellement plus de cent grammes.

Si un certain nombre de facteurs hydrologiques semble pouvoir expliquer le transport en suspension, deux apparaissent plus particulièrement significatifs; aussi bien sur les petits que sur les grands bassins: le volume écoulé par l'évènement, et la pluie moyenne qui l'a engendré. Ces deux facteurs constituant la base de la connaissance hydrologique des bassins, leur bonne relation avec le transport en suspension apparaît d'autant plus intéressante.

CHAPITRE 4

"ETUDES GEOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES"

A. LES MARQUAGES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES NATURELS

I. PRINCIPE DES ISOTOPES ET DONNEES GEOCHIMIQUES ANTERIEURES:

1) Principe des isotopes du milieu dans les eaux naturelles:

L'utilisation des traceurs en hydrologie est une pratique déjà ancienne. Si le traçage artificiel apparaît particulièrement adapté à l'étude des phénomènes limités dans le temps et dans l'espace, son utilité est souvent très spécifique et sa mise en œuvre très exigeante, des coûts à la maîtrise des techniques.

Le traçage naturel du milieu qui recouvre lui toutes les approches de type hydrochimique, et dont le régime est généralement permanent, présente aussi l'avantage de "ne pas être limitatif, ni dans la dimension, ni dans la durée" des phénomènes.

Cet avantage justifie sans doute que l'utilisation des marqueurs physico-chimiques et chimiques traditionnels (Température, pH, conductivité, ions majeurs), comme celle des isotopes stables (oxygène et hydrogène), déjà exposée depuis plus de trente ans par diverses écoles (danoise, canadienne, française, italienne, suisse, américaine ou israélienne) trouve un regain d'intérêt dans l'investigation et l'explication des phénomènes hydrologiques.

Le principe des isotopes est présenté en annexe 4-A.I,1; les relations chimiques et physico-chimiques des eaux en annexe 4-A.I,2.

2) Les données géochimiques et isotopiques antérieures sur l'Air:

A partir du milieu des années soixante dix, les conséquences de la sécheresse installée depuis près de dix ans (cf chapitre sur les pluies) sur l'Air ont commencé à alerter les autorités locales; la limitation des écoulements entraînant en particulier un infléchissement préoccupant de la nappe alluviale du kori Téloua, dans laquelle sont installés les forages (B₂, C₃) qui alimentent en eau la ville d'Agadez.

La coopération internationale, en particulier allemande, suisse et française, s'est mobilisée pour essayer, à partir des études de surface sur les écoulements et des investigations hydrogéologiques, de doper le système de recharge de la nappe. A cette fin, bon nombre d'actions, dont certaines ont donné lieu à publication ou note scientifique (Balmer et Muller, 1988; Plata Bedmar et al., 1989; Joseph et Frangi 1989; Gallaire et al., 1990) se sont attachées à mettre en évidence les mécanismes de recharges tant hydrologiques, qu'hydrogéologiques, en utilisant les outils chimiques et isotopiques.

a) Les caractères chimiques des eaux de l'Air et de son environnement:

Malgré la forte évaporation, la conductivité des eaux des nappes de la dépression périphérique de l'Air reste inférieure à $500 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Aranyossy et Joseph, 1985; Joseph et Frangi, 89). Ces faibles valeurs, qui indiquent que ces eaux ont été très peu soumises au phénomène de concentration des sels par réduction du volume d'eau, apparaissent d'autre part parfaitement corrélées avec les charges salines totales qui ne dépassent pas un gramme par litre. Cette bonne relation suggère que ces eaux doivent avoir le même type de faciès chimique; qu'en tout état de cause elles proviennent d'une même province hydrochimique.

La relation qui lie la minéralisation totale "R" en mg/l à la conductivité "C" en $\mu\text{s}/\text{cm}$:

$$R = 0,77 C$$

montré que l'ablation mécanique représente près de 80 % de l'érosion; 23 % seulement étant liés aux phénomènes chimiques (Joseph, 1990).

Conséquence de la faiblesse de la charge en ions, les forces ioniques sont comprises entre $1,6\cdot 10^{-3}$ et $6,45\cdot 10^{-2}$.

b) Les faciès chimiques:

Les eaux des formations alluvionnaires de l'intérieur du massif apparaissent bicarbonatées calciques avec un pH légèrement acide et une conductivité faible ($\approx 100 \mu\text{s}$). A la périphérie de l'Air elles sont aussi bicarbonatées calciques, mais un pôle sodique fait son apparition (Garnier et Fontes, 1980; Roussin Bariac, 1985; Aranyossy et Joseph, 1985); le pH et la conductivité sont plus élevés. Sur certains bassins, comme sur le haut Téloua, l'existence d'un volcanisme (Mont Todgha) très alcalin (basaltes), qui enrichit les eaux de ruissellement en sodium et potassium, peut réaliser un véritable marquage d'origine.

La bonne relation (linéaire) qui lie conductivité et alcalinité indique que ce sont les bicarbonates qui président à la mise en solution ionique des constituants matriciels.

L'étude menée par Roussin-Bariac (1985) sur les mécanismes pouvant être à l'origine d'un faciès bicarbonaté (altération des silicates et, en particulier des plagioclases en présence de CO_2 ; dissolution de carbonates de calcium et de sodium; oxydation de la matière organique dans la zone saturée), ne permet pas de mettre en évidence la prééminence de l'un ou l'autre des deux premiers mécanismes (l'oxydation de la matière organique étant considérée comme négligeable) dans la formation du CITD (Carbone Inorganique Total Dissous). Elle en conclut néanmoins qu'en raison de la présence de silice dans l'eau des nappes, de l'environnement cristallin du massif (granites et gneiss) et de la nature argilo-limono-sableuse des milieux phréatiques, le mécanisme principal doit être celui de l'altération des silicates; des feldspath plagioclases en particulier.

Cette altération, dans certaines conditions (comme une forte évaporation; cas dans l'Air) peut amener une précipitation de la calcite qui, remise en solution lors d'une nouvelle phase aqueuse, pourra occasionner ponctuellement des concentrations élevées en calcium.

Les échantillons d'eau collectés dans les nappes alluviales le long des axes bien drainés de l'Aïr se situent dans le domaine de stabilité de la Kaolinite (Joseph et Frangi, 1989)

Par contre ceux prélevés dans les nappes des grès à la périphérie présentent un cachet hydrochimique du domaine de la montmorillonite, aussi bien sodique que calcique (Garnier et Fontes, 1980; Roussin-Bariac, 1985).

Les expériences de terrain montrent que l'écoulement dans la nappe de la cuvette d'Agadez s'accompagne d'une augmentation de la minéralisation qui n'est pas liée à l'évaporation (qui occasionnerait une reconcentration des éléments, dans la même proportion, sous cet effet) mais à l'hydrolyse progressive, en fonction du temps et de la vitesse de circulation, des plagioclases originaires du massif de l'Aïr. Le faciès bicarbonaté évolue de l'amont vers l'aval du pôle calcique au pôle sodique (Roussin-Bariac, 1985).

Les fortes valeurs locales en nitrates (jusqu'à plus d'un méq/l) ne peuvent provenir, tout au moins pour les eaux superficielles, que d'une pollution pastorale. Car, sans écarter certaines hypothèses émises sur l'existence naturelle de nitrates dans les eaux de pluie des régions subtropicales:

.émanations de la forêt tropicale entraînées vers le nord par la mousson,

.oxydation de l'azote de l'air par les décharges électriques des orages (Sisteron, 1990)

.mise en suspension d'éléments du sol lors des coups de vent précédant les pluies (Summer et Fricke, 1989). Les concentrations ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$) relevées dans les eaux de pluies, à Niamey comme à Agadez (0,75 à 0,80 mg/l) entre 1985 et 1988 (Joseph, 1990), montrent qu'un facteur dix existe entre les eaux atmosphériques et souterraines régionales.

Les aquifères dans le massif sont généralement isolés hydrauliquement et reflètent les conditions locales d'alimentation; les eaux de pluies sont, en raison des pentes des bassins, et de la perméabilité des nappes alluviales, rapidement infiltrées et soustraites aux phénomènes d'évaporation.

Dans les nappes sédimentaires de bordure, l'absence de signe d'évaporation (qui pourrait être une concentration de certains ions chlorures ou sulfates) semble montrer que les zones d'épandage de piémont (cônes de déjection des koris à la sortie du massif) ne participent pas à la recharge en profondeur des grès.

c) Les faciès isotopiques des nappes; l'antécédence des eaux de l'Aïr:

(Joseph et al., 1986, 1989, 1990, 1992)

A la périphérie, la plupart des eaux de nappe des grès n'ont subi aucune contamination par le tritium au cours des quarante dernières années, alors que celles des nappes alluviales à l'intérieur du massif ont une teneur supérieure à 20 UT (Plata-Bedmar et al, 1989) qui montre leur alimentation récente et directe par les précipitations actuelles; généralement moins de dix ans. Localement cependant, comme à Timia ou El méki, un aquifère de plus grande importance lié au verrouillage du talweg par une coulée basaltique, mettrait en évidence un système "piston flow" et des eaux plus anciennes de 15 à 20 ans (Joseph et Frangi, 1989).

Les analyses Carbone-14 confirment celles de tritium: l'activité des eaux à l'intérieur du massif, supérieure à 100 %, signe bien une origine récente.

Dans les eaux de bordure, par contre, les teneurs en ^{14}C qui chutent rapidement ont une signification moins nette, car elles peuvent signaler:

- . ou des eaux plus anciennes (décroissance radioactive), ce qui est probable,
- . mais aussi un mélange d'eaux de différentes origines,
- . ou un mélange avec la matrice du sol.

La modélisation des aquifères du Téloua permet de mettre en évidence la variation des teneurs en oxygène-18 dans la partie intermédiaire et aval du bassin (entre Dabaga et Agadez), figure 4-A.0.

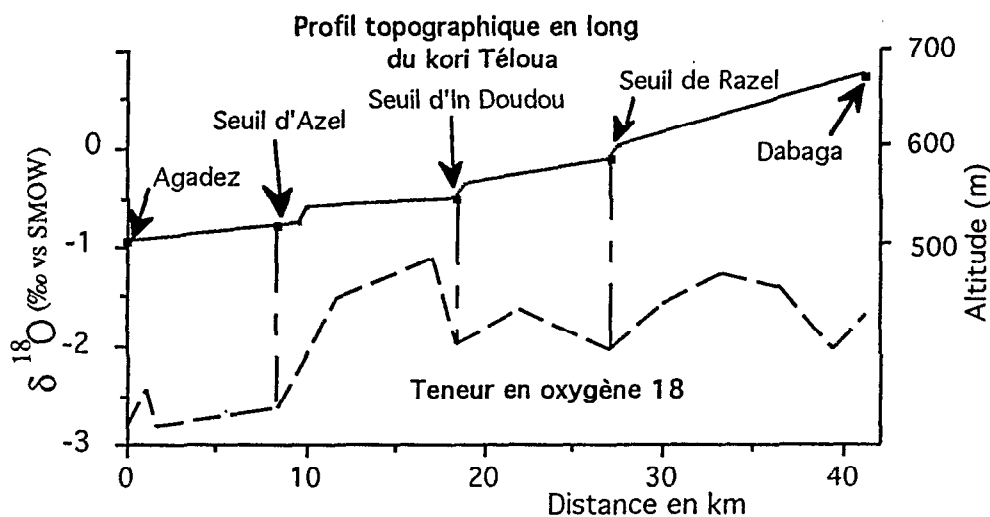


Fig. 4-A.0 Evolution de la teneur en oxygène-18 des eaux de nappe du kori Téloua entre Dabaga et Agadez (d'après thèse A. Joseph)

Les valeurs évoluent de - 1 à - 2 δ ‰ entre Dabaga et Azel, où les accumulations alluviales sont encore relativement modestes; par contre à l'aval d'Azal, l'épaississement des dépôts du cône de déjection, limitant le taux d'évaporation, permet de retrouver des valeurs plus appauvries (de - 2 à - 3 δ ‰).

Les teneurs en oxygène-18 relevées par Roussin-Bariac (1985) sur les puits et forages alluviaux de la cuvette d'Agadez sont comprises entre 0 et - 5 δ ‰, avec une nette majorité de valeurs entre - 3 et - 4 δ ‰.

Les eaux plus profondes des nappes de grès affichent des teneurs encore plus appauvries; sur la nappe de Tchirozérine, (Aranyossy et Joseph, 1985; Aranyossy, 1991; Joseph et al., 1990) notent des valeurs de - 7 à - 8 δ ‰, qui montrent que la recharge de ces nappes n'a pu se faire qu'à des périodes plus humides, et ou plus froides (des pluies à - 7, - 8 δ ‰ étant assez peu fréquentes actuellement), et que les rapports avec les milieux alluviaux sus-jacents sont, dans les conditions actuelles, très faibles, sinon inexistantes.

d) Le faciès isotopique des pluies: (Joseph et al, 1989, 1990, 1992; Mathieu et al, 1993; Roussin-Bariac, 1985; Rozanski et al, 1992)

Les rares études sur les pluies de l'Aïr (Roussin-Bariac, 1985; Joseph et al, 1989, 1992) montrent que ces dernières sont évaporées; pente de la relation deutérium - oxygène-18 inférieure à "8". La pente de la droite d'évaporation locale comprise entre 4 et 6, et la valeur de son intercept avec la droite météorique mondiale ($\approx -5 \text{ ‰}$), montre que l'origine des pluies de l'Aïr est le golfe de Guinée (Rozanski et al, 1993). Exceptionnellement, dans le contexte climatique actuel, certaines pluies pourraient produire des valeurs d'oxygène-18 de l'ordre de -8 ‰ ; à la faveur de phénomènes convectifs de très haute altitude, liés (Mathieu et al, 1993) ou non, à l'existence de lignes de grains, dont l'extension nord, jusqu'à une latitude proche du sud de l'Aïr, est attestée par l'imagerie satellitaire (Guillot et al, 1988)

En 1986 A. Joseph ne parvient pas à dégager sur l'oxygène-18 des pluies du Téloua un effet d'altitude; la dénivelée des postes pluviométriques n'étant apparemment pas suffisante. Mais il met en évidence à partir de mesures sur les sources et aguelmams de l'ensemble du massif (dont le différentiel des altitudes moyennes des bassins est plus important) un gradient d'altitude de $-0,24 \text{ ‰}$ par 100 m, entre 600 m et 1800 m.

Il fait également apparaître, au travers de l'étude isotopique des pluies mensuelles cumulées du haut Téloua, un effet de masse de juin à juillet, sur plusieurs postes du bassin, tableau 4-A.1.

Poste pluvio	Mois	Hauteur	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
34	06	14,5	0,35	5,0
34	07	43,5	-3,71	-21,4
33	06	1,4	2,51	
33	07	27,5	-2,56	12,9
31	06	10,6	0,19	12,1
31	07	17,4	-1,00	-6,4

Tab. 4-A.1 "Effet de masse" sur les pluies du Téloua en 1990

II. APPLICATION AUX PLUIES DE L'AÏR

1) Rappels sur la situation pluviométrique régionale (Ch. 2-A.III,2)

a) Situation des postes et collecte de la pluie pour analyse:

Mises à part quelques actions ponctuelles au milieu des années quatre vingt (Joseph et al, 1986, 1989), la collecte systématique d'eau de pluie pour analyses chimiques et isotopiques n'a commencé, dans le cadre des études ORSTOM, qu'à partir de 1988 (Gallaire et al., 1995).

Sur le bassin du Téloua les postes pluviométriques échantillonnés ont été ceux d'Azél, Dabaga, Aoudéras et Abardok; leur distribution assurant une couverture assez homogène de l'espace du bassin (cf fig. bassin du Téloua).

Dans le nord de l'Aïr et le Ténéré, jusqu'à la frontière algérienne, cinq postes totalisateurs, installés pour certains (Iwelen, Temet, Bous) depuis 1981, et échelonnés en latitude sur près de deux degrés, n'ont été relevés qu'occasionnellement au cours des premières années, à la faveur de missions archéologiques ORSTOM de F. Paris et J.P. Roset (1987). A partir de 1988, deux missions de collecte ont été organisées chaque année: une après la saison des pluies en octobre, et une en fin de saison sèche, avril (fig.4-A.1).

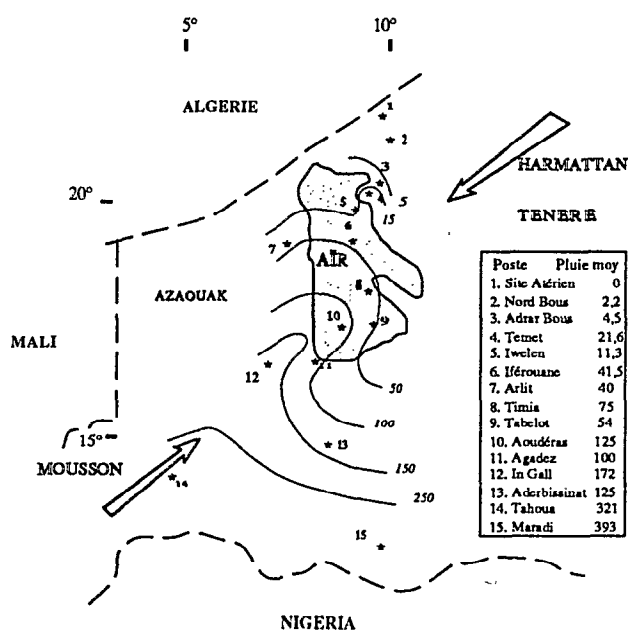


Fig. 4-A.1 : Isohyètes et pluviométrie interannuelles région Aïr et nord-Aïr (1978 - 1990)

Le poste "Iwelen", sur un gisement néolithique, se trouve encore en position d'abri à l'intérieur du massif. Celui de Temet se situe en bordure orientale de l'Aïr, dans la dépression périphérique qui sépare le massif des dunes (cf fig.I-A.6). Le poste de l'Adrar Bous est déjà en plein Ténéré, dans l'effondrement sud-nord qui scinde le massif en deux dans sa partie occidentale (en tamashek, langue Touareg, Adrar Bous signifie "montagne coupée").

L'avant dernier pluviomètre se situe à soixante dix kilomètres au nord du "Bous" dans une vallée en bordure d'un grand glacis d'ennoyage qui plonge vers la frontière algérienne et sur lequel on trouve à 50 km au nord du précédent, à proximité d'un ancien site lacustre, sur la feuille topographique IGN "Rocher Toubreau", le dernier totalisateur.

Le tableau 4-A.2 permet de situer géographiquement les postes et d'observer l'effet de la latitude sur l'aridité du climat, en même temps que la limite nord d'influence de la mousson guinéenne au cours de la dernière décennie.

STATION	SITUAT. GEOG			PLUIE ANNUELLE	
	Lat. N	Lg.E	Al (m)	P moy. (mm)	(Nbre d'an)
AZEL	17°00'	8°03'	526	99,8	(13)
DABAGA	17°19'	8°08'	650	116	(13)
AOUDERAS	17°38'	8°25'	850	125	(13)
ABARDOK	17°31'	8°39'	830	67	(3)
TABELOT	17°35'	8°55'	840	54	(12)
TIMIA	18°07'	8°46'	1100	75	(12)
IFEROUANE	19°03'	8°25'	650	41,5	(13)
IWELEN	19°47'	8°25'	675	11,3	(9)
TEMET	19°58'	8°40'	1050	21,6	(9)
ADRAR BOUS	20°21'	8°58'	760	4,8	(9)
NORD BOUS	21°10'	9°15'	630	2,2	(9)
S. ATERIEN	21°40'	9°11'	600	0,0	(3)

Tab. 4-A.2 Situation et pluie moyenne des postes relevés depuis 1978 dans le nord du Niger

b) distribution des précipitations:

La figure 4-A.1 et le tableau précédant permettent d'effectuer un bref rappel des conditions pluviométriques régionales:

Le tracé des isohyètes figure parfaitement l'origine sud-ouest des masses d'air humides. Les précipitations apparaissent nettement plus abondantes à l'ouest du massif qu'à l'est:

Ainsi, à latitude et altitude équivalentes, la moyenne interannuelle de la période 1978-1990 passe de 125,3 mm à l'ouest (Aoudéras) à 53,6 mm à l'est (Tabelot); le poste intermédiaire d'Abardok affichant une valeur de 67,2 mm.

La répartition sud-nord apparaît moins régulière :

Dans un premier temps l'effet d'altitude s'oppose à celui de continentalité: la moyenne pluviométrique des douze dernières années croit d'Azél (99,8 mm) à 17°N et 526 m d'altitude, à Aoudéras (125,3 mm) à 17°38'N et 810 m d'altitude, au pied de la première barrière importante du massif (Monts Todgha et Bagzanes).

Suite à cet effet orographique, les masses pluviogéniques apparaissent affaiblies, vers le nord, en quantité (épaisseur) et en qualité (humidité). L'effet de continentalité impose sa loi aux précipitations annuelles qui diminuent alors régulièrement: 75 mm à Timia par 18° nord, 41,5 mm à Iférouane par 19°12' nord.

Au delà, le gradient s'accélère encore avec la latitude, et d'autant plus que l'on pénètre le milieu désertique du Ténére:

- 21,6 mm à Temet par 19°58'N,
- 4,8 mm sur l'Adrar Bous à 20°21'N,
- 2,2 mm au nord du Bous par 21°10'N,
- 0 mm sur le site atérien à 21°40'.

L'effet de continentalité s'impose donc finalement au delà de 18 degrés nord, même si, localement, l'effet orographique persiste encore; la pluviosité annuelle des monts Tamgak (19° nord et 1500 m d'altitude moyenne) dépasse 90 mm, alors que celle d'Iférouane (650 m) à leurs pieds et à leur vent, n'est que de 56 mm.

2) Caractérisations chimique et isotopique des eaux de pluie de l'Aïr:

a) Le caractère physico-chimique des précipitations:

L'annexe 4-A.II,3 fait le point sur la qualité naturelle des eaux de pluies. L'analyse des eaux de pluie collectées dans l'Aïr entre 1988 et 1990 a donné les résultats suivants:

– Les mesures de pH et de conductivité de 1990: (Tab 1 de l'annexe 4-A.II,2):

Le pH des eaux du poste d'Azél qui varie de 5,5 à 6,5 (les valeurs extrêmes étant 5,28 et 7,67; la valeur moyenne non pondérée de 6,21), à l'écart de l'influence anthropique, reflète la valeur des précipitations sud-Aïr .

La conductivité reste modérée, en dessous de 100 μ s, sauf pour quelques valeurs extrêmes (200 à 300 μ s), de début et fin de saison des pluies, qui gonflent la moyenne (120 μ s). De même quelques pH élevés (autour de la neutralité) correspondent-ils en début et fin d'hivernage à des conductivités et minéralisations élevées qui révèlent des phénomènes d'évaporation: valeurs supérieures en chlorures et sulfates des pluies des 23/7/90 et 6/9/90.

A ces valeurs plus élevées de chlorures et sulfates correspondent des valeurs plus faibles en nitrates qui semblent donc relever aussi d'autres phénomènes que ceux d'évaporation.

Quelques pH élevés ne correspondent pas à d'importantes minéralisations et bien que la conductivité soit assez soutenue (10/7/90). Le phénomène correspond vraisemblablement à une accumulation indésirable d'aérosols, dans le pluviomètre, entre deux pluies.

Globalement, aux valeurs faibles de la pluie (< 5 mm) correspondent les pH et les conductivités les plus élevés, en liaison avec les minéralisations les plus fortes; comme l'illustrent les figures de l'annexe 4-A.II,5.

La même série d'investigations menées sur les pluies d'Aoudéras montre qu'à l'intérieur du massif la signature physico-chimique des eaux est sensiblement différente (tableau 1 de l'annexe 4-A.II,2 et figures de l'annexe 4-A.II,6):

Les pH sont plus élevés, d'une unité (non pondérée) en moyenne. La variation s'effectue toujours globalement en sens inverse de la quantité précipitée, mais elle apparaît beaucoup moins importante. Le cœur de la saison des pluies (fin juillet-début août) présente une stabilité que l'on retrouve dans la courbe d'évolution de la conductivité et des anions.

La conductivité, comme la minéralisation, est en sensible augmentation. La diminution du rapport sulfate/chlore, révélateur du caractère continental recyclé des précipitations (lorsqu'il est supérieur au rapport de l'eau de mer 0,3), apparaît ici singulier, puisqu'à un degré supérieur

de continentalité correspond effectivement une concentration plus importante en chlore. Ce fait étant confirmé par les rapports SO_4/Cl de Dabaga, et plus encore d'Abardok à l'est du massif, où certains rapports de début ou de fin de saison des pluies approchent ceux de l'eau de mer.

Compte tenu des valeurs de sulfates elles-mêmes en sensible augmentation, les valeurs de chlorures élevées (près de 270 mg/l le 20/7/90) ne peuvent que signaler d'importants phénomènes d'évaporation:

Les sels précipités au sol, à la suite de l'évaporation des pluies antérieures, sont remis en suspension dans l'atmosphère par les coups de vents qui précèdent généralement les précipitations dans ce milieu, avant d'être lessivés (wash-out) par la pluie qui suit (Annexe 4-A.II,3).

Ces phénomènes de reconcentration en sels des eaux de pluie seront d'autant plus sensibles, comme le montre les tableaux 1 à 3 de l'annexe 4-A.II,2:

.que les événements seront espacés; les sels issus de l'évaporation directe ou de migrations de la zone superficielle des sols, ayant eu le temps d'être remis en suspension,

.que les quantités d'eau précipitées seront faibles; ce qui est souvent le cas des pluies de début et de fin d'hivernage. Dans ce cas les cycles successifs précipitation-évaporation étant moins nombreux, les eaux des précipitations seront moins concentrées en chlorures et sulfates.

Les effets évaporatoires apparaissent aussi au travers des figures de l'annexe 4-A.II,4 qui présente les concentrations anioniques en fonction de l'importance des précipitations:

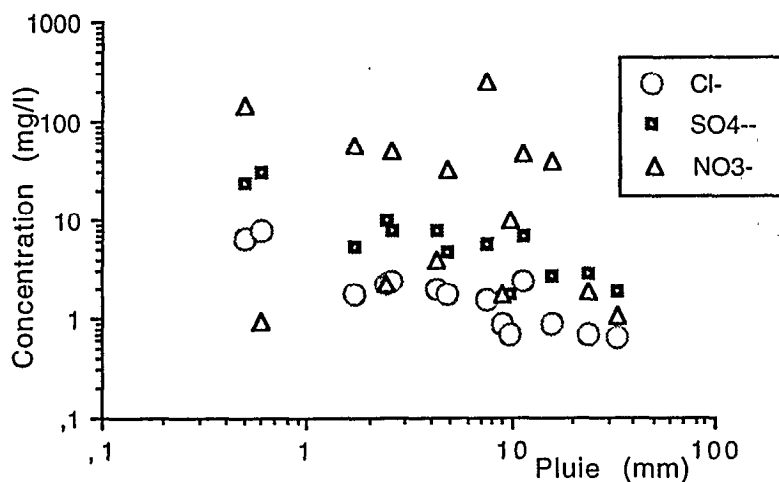


Fig. 4-A.2 Concentrations-hauteurs précipitées à Azel en 1988

La figure 4-A.2, met en évidence la relation inverse existant en 1988 à Azel entre les concentrations en chlorures-sulfates et la hauteur des pluies:

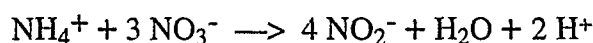
$$[Cl^-] = -3,23 \text{ Log } P(\text{mm}) + 4,55 \quad (r^2 = 0,71)$$

$$[SO_4^{2-}] = -12,88 \text{ Log } P(\text{mm}) + 17,11 \quad (r^2 = 0,70)$$

Les valeurs de sulfates toujours supérieures aux valeurs de chlore attestent d'un rapport sulfate/chlore supérieur à "1" qui confirme le caractère continental recyclé des eaux de pluie. Les

chlorures qui servent de noyaux de coalescence lors de la phase de condensation sont soustraits progressivement à la masse condensante, au fur et à mesure de sa progression sur le continent et des épisodes pluvieux successifs; c'est le phénomène de *rain-out* (Junge, 1963)

Les valeurs en nitrates, extrêmement dispersées, semblent ne pas correspondre aux mêmes processus et avoir deux origines: l'une naturelle correspondant à la formation de NO par les décharges électriques ionisantes des phénomènes orageux convectifs à l'origine de la quasi totalité des pluies locales; l'autre liée, comme pour les phosphates lorsqu'ils apparaissent, à des pollutions anthropiques ou animales. La présence occasionnelle de nitrites (Annexe 4-A.II,2 tab.1&2) peut être liée de même à une pollution ou à une dégradation de NO₃⁻ dans une réaction redox avec NH₄⁺:



– La différence des relations "concentration - quantité précipitée" à Azel et Aoudéras de 1988 à 1990 (fig. a, b de la relation 1988 et a, c de la relation 1990 de l'annexe 4-A.II,4) met en évidence la variation des régimes précipitants, qui s'exprime à deux niveaux:

. celui de la liaison; resserrée à Azel en 1988, elle souligne la régularité des phénomènes; plus médiocre en 1990, où la dispersion est révélatrice de phénomènes plus variés.

. celui de la dépendance; médiocre mais réelle en 1990 à Aoudéras, soulignant l'existence d'une évolution, la relation entre concentration et quantité de pluie apparait totalement indépendante en 1988, démontrant ainsi l'homogénéité de la masse d'air cette année là (mis à part quelques points correspondant à des événements de début d'hivernage) fig. 4-A.3:

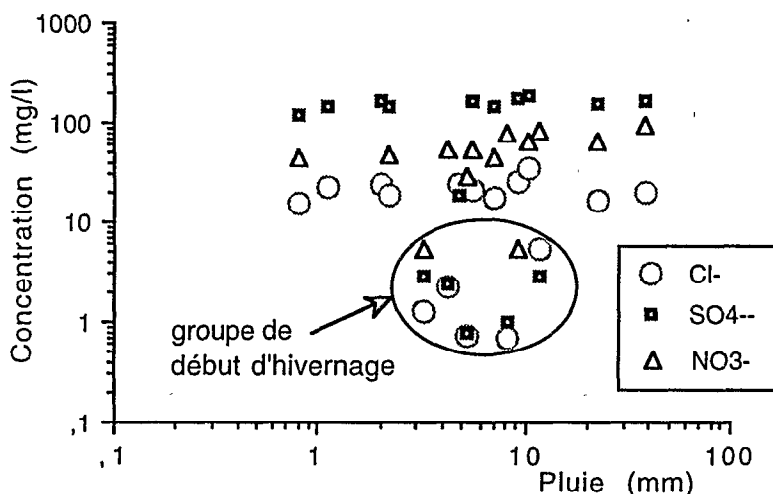


Fig. 4-A.3 Concentrations-hauteurs précipitées à Aoudéras en 1988

Si on considère d'autre part que les concentrations en nitrates sont pour la grande majorité des pluies, et des stations, les plus fortes des anions (annexe 4-A.II,4), et témoignent vraisemblablement de convections orageuses de haute altitude; les valeurs relativement moins élevées de 1988, entre sulfates et chlorures pourraient révéler des mouvements moins dynamiques, liés à la présence d'une masse de mousson plus épaisse et homogène.

– Les concentrations relevées dans les échantillons du nord de l'Aïr et du Ténéré (Tab. 4 et 5 de l'annexe 4-A.II,2) signalent un caractère encore plus continental et évaporé: en 1989 le rapport SO_4/Cl des eaux de pluie de Temet ou du Bous apparaît en net retrait par rapport aux eaux de l'Aïr.

Lorsqu'il n'a pas plu et que les "retombées sèches" ont été recueillies par rinçage du pluviomètre avec 100 ml d'eau distillée, les concentrations en chlorure apparaissent naturellement encore plus élevées.

L'analyse des retombées sèches d'Iwelen en 1989 (annexe 4-A.II,2) est révélatrice de la différence saisonnière de teneur en chlore des masses d'air du massif: un facteur 5 sépare les concentrations atmosphériques de la saison sèche ($9,92 \text{ mg.l}^{-1}$) de celles de la saison humide ($50,9$); alors que l'écart des sulfates apparaît moindre ($1,97 \text{ mg.l}^{-1}$ en période sèche, pour $2,49 \text{ mg.l}^{-1}$ en hivernage).

Tous les facteurs physico-chimiques et chimiques des eaux pluviales convergent donc pour montrer l'importance de l'évaporation dans le milieu de l'Aïr. Les concentrations ioniques soulignent que le phénomène croît avec la latitude (continentalité) et avec la longitude "est"; confirmant ainsi les observations effectuées au chapitre II sur l'aridité accrue, à latitude égale, de la partie orientale du massif.

Les analyses isotopiques vont montrer que la pluie elle-même est atteinte par l'évaporation dans l'intimité de sa molécule d'eau.

b) Le faciès isotopique des pluies de l'Aïr:

Comme pour la chimie, l'étude isotopique des pluies de l'Aïr a été menée à partir des prélèvements effectués sur le bassin du Téloua et dans le nord du massif. L'annexe 4-A.I,1 rappelle le principe des isotopes des eaux de pluie (Merlivat et Jouzel, 1979).

Les résultats d'analyses isotopiques sont présentés dans les tableaux 1 à 7 de l'annexe 4-A.II,1.

Le faciès isotopique des pluies de l'Aïr est souligné par la relation deutérium-oxygène 18 (fig.4-A.4) de l'ensemble des précipitations des trois années 1988 1989 et 1990 qui témoigne d'une même origine de vapeur, et de processus contrôlés par des conditions climatiques de même nature. La valeur en oxygène-18 ($\approx -5 \pm 2,3$) du point d'interception de cette relation avec la droite météorique mondiale (GMWL: Global Meteoric Water Line), suggère que cette origine soit le golfe de Guinée (Dansgaard, 1964).

$$\delta^2\text{H} = 4,63 (\pm 0,30) \delta^{18}\text{O} - 8,19 (\pm 1,46) \quad (r^2 = 0,83)$$

La pente de cette droite (4,63) et sa position en dessous de la Droite Météorique Mondiale, signalent une reprise évaporatoire sensible de la majorité des précipitations.

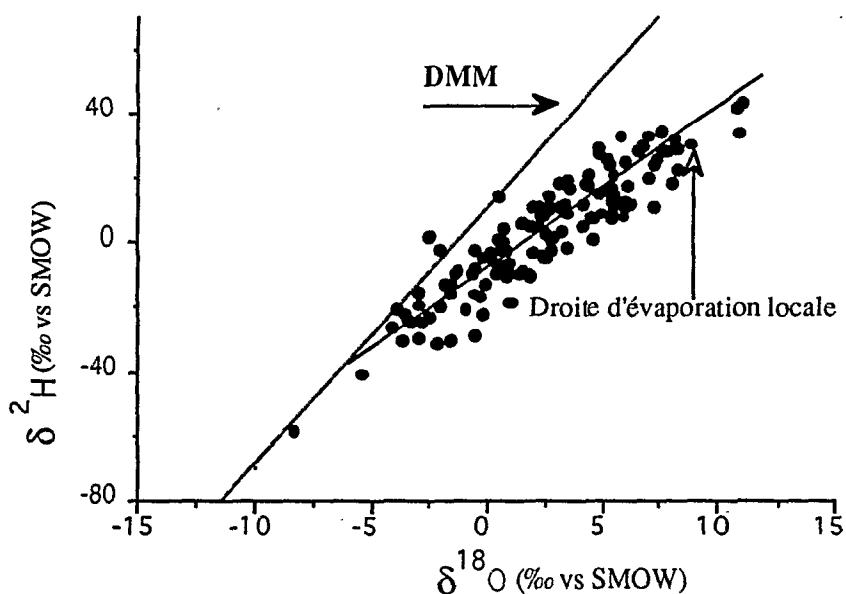


Fig. 4-A.4 : Relation deutérium- oxygène 18 des pluies de l'Air entre 1988 et 1990

La forte proportion d'événements de faible importance à caractère évaporé (75% des pluies sont inférieures à 5 mm; la moitié encore à 10 mm) est soulignée par la figure 4-A.5: Plus de 50% des pluies apparaissent enrichies ($\delta^{18}\text{O} > 0$)

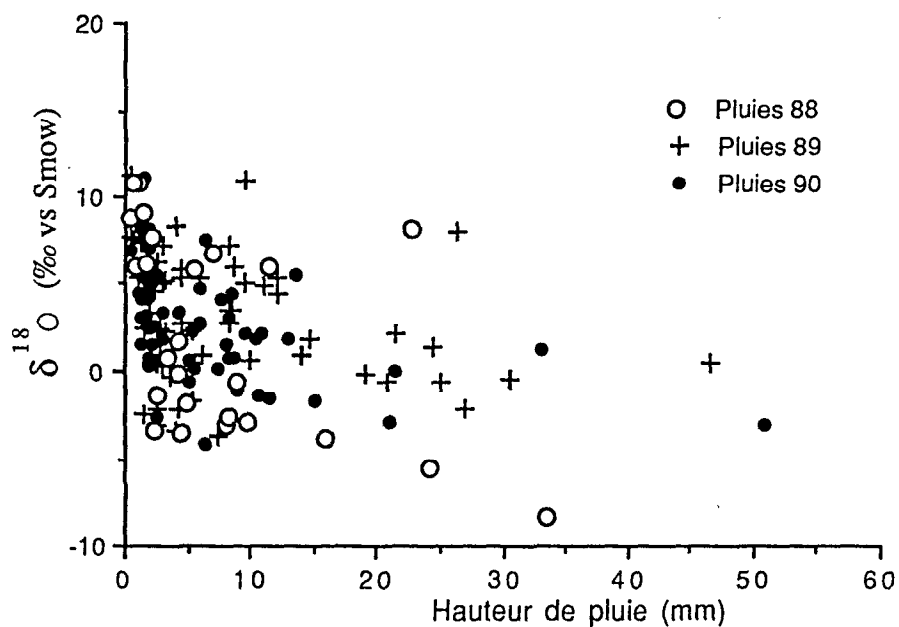


Fig. 4-A.5 Oxygène 18 des pluies de l'Air, en fonction des hauteurs précipitées, de 1988 à 1990.

La majeure partie des précipitations doit donc s'effectuer dans une atmosphère non saturée qui les soumet à des échanges cinétiques en cours de chute; l'humidité relative de l'air, mesurée au moment des pluies, pour la plupart inférieures à 10 mm, présente le plus souvent un caractère nettement sous-saturé (tab.1 et 5 de l'annexe 4-A.II,1).

L'humidité relative moyenne apparaît nettement plus favorable durant l'hivernage 1988 que durant celui de 1990:

Humidité relative moyenne à Azel en 1988 = 69 % \pm 10 %

Humidité relative moyenne à Azel en 1990 = 58 % \pm 11 %

Cet écart souligne l'importance de la variation de l'humidité au moment des précipitations. Dubief, dans ses études sahariennes (1953), pressentait que le nombre d'événements pluvieux dans le domaine sub-désertique, ne devait guère être différent de ce qu'il est dans le reste du domaine tropical; mais que, traversant une atmosphère particulièrement sous-saturée, nombre de ces événements ne parvenaient jamais au sol.

Ces échanges sont d'autant plus importants que la quantité de pluie est faible, et vice versa.

Un "effet de masse" se dégage pour les pluies de l'Air sur la figure 4-A.5:

C'est parmi les pluies inférieures à 10 mm que l'on rencontre les valeurs les plus enrichies en oxygène 18. Dans ce groupe de pluies la dispersion des teneurs est importante: $-3,5 < \delta \text{‰} < +11$. Au delà de 15 mm la dispersion est moindre et les teneurs plus appauvries: $0 < \delta \text{‰} < -8$.

L'évolution de la teneur en oxygène 18 des pluies en cours d'hivernage est conforme au schéma habituel:

. les pluies de début de saison (mi juin - mi juillet), traversant une atmosphère particulièrement sous saturée, apparaissent toutes enrichies, quelle que soit la quantité précipitée (certaines pluies atteignent 25 mm). L'effet de masse est peu sensible au cours de cette période.

. de même les pluies de fin de saison (mi août - mi septembre) présentent des teneurs élevées; l'espacement des occurrences et leur faiblesse (majorité de pluies < 5 mm) expliquant le retour à une atmosphère sous-saturée.

. au cœur de la saison (mi juillet - mi août) les précipitations les plus importantes présentent bien les teneurs isotopiques les plus négatives. Mais un certain nombre de pluies inférieures à 10 mm apparaissent également appauvries:

Au cours de cette période, l'importance et la fréquence des événements étant plus grandes, l'atmosphère est maintenue dans un état plus proche de la saturation que celui des périodes encadrantes; les échanges en cours de chute (Majoube, 1971) sont plus limités, y compris pour des pluies faibles.

La variation de la teneur annuelle pondérée en oxygène 18 des pluies de 1988 et 1990 (fig.4-A.6) met en évidence le rôle inhabituel joué par l'altitude et la latitude, qui produisent un enrichissement, dans la partie sud comme dans la partie nord du massif:

– Le phénomène d'altitude qui engendre normalement (Fontes, 1976; Fontes et Olivry, 1976; Yurtsever et Gat, 1980) un appauvrissement des pluies en isotopes lourds, en raison de températures de condensation plus basses, et d'échanges limités en cours de chute, est ici occulté par l'affaiblissement, très rapide à cette latitude, des masses d'air pluvio-gènes, et par la permanence de la sous saturation de l'ensemble de la colonne atmosphérique. Sous ces climats.

subdésertiques les températures restent élevées en saison des pluies car les événements fréquemment espacés de plusieurs jours (voire de plusieurs semaines) ne permettent pas un véritable rafraîchissement de l'atmosphère, qui retrouve très vite, après la pluie, un sévère profil d'aridité.

– Le phénomène de latitude (ou de continentalité, dans notre cas) qui appauvrit progressivement les masses océaniques, au cours de leur déplacement sur le continent, par condensations successives et échanges cinétiques (Dansgaard, 1964; Fontes et Gonfiantini, 1967; Fontes, 1976; Fontes, 1980; Gonfiantini, 1995), est aussi masqué par l'importance de l'évaporation à tous les niveaux. Cette évaporation se traduit, dans les cycles successifs, par un enrichissement isotopique progressif qui génère finalement l'inversion du gradient de continentalité.

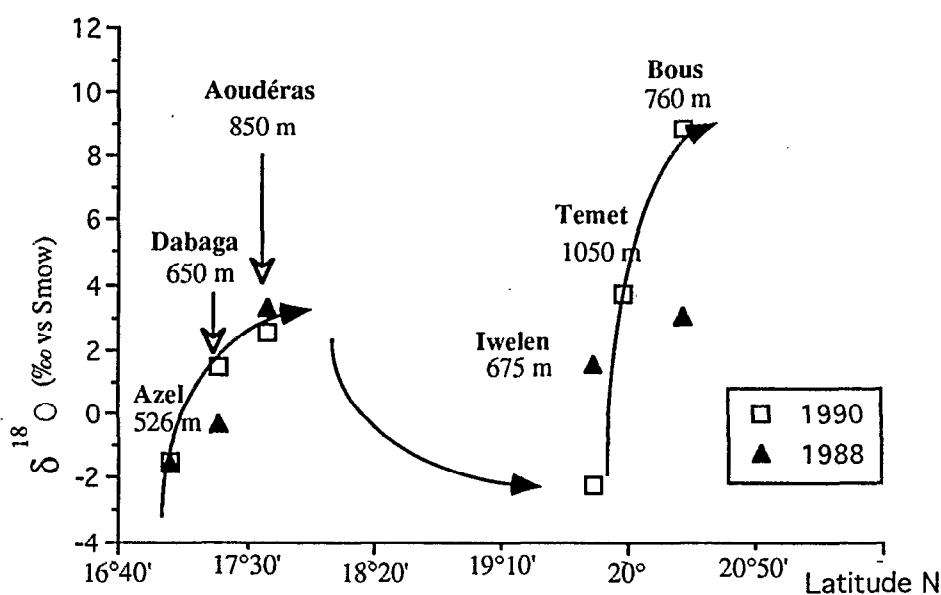


Fig. 4-A.6 Variation de la teneur annuelle pondérée en oxygène 18 des pluies, en fonction de la latitude et de l'altitude.

L'appauvrissement isotopique, constaté sur cette figure, entre le poste d'Aoudéras et le poste d'Iwelen, qui constitue un retour au schéma habituel de continentalité (Dansgaard, 1964; Majoube, 1971; Eriksson, 1983) suggère qu'au centre du massif :

.la reprise évaporatoire pourrait être moindre. Ce fait est peu vraisemblable, malgré l'altitude, la reprise évaporatoire des précipitations au sol étant retardée par rapport à la pluie elle-même. La vapeur qui produit la pluie devrait donc s'appauvrir en isotopes lourds au fur et à mesure qu'elle progresse sur le continent.

.les températures de condensation pourraient être plus basses, générant ainsi des teneurs isotopiques plus appauvries à la base des nuages.

Ce cas de figure paraît le plus vraisemblable dans la mesure où les effets orographiques, et plus encore radiatifs, des surfaces cristallines et volcaniques à faible albédo,

peuvent stimuler les convections et entrainer à haute altitude l'air faiblement humide circulant sur le centre du massif.

L'aridité extrême qui se dégage ensuite sur la bordure nord-est de l'Aïr (Temet), et le passage dans le désert du Ténééré (Bous), explique le retour au schéma inverse et aux valeurs enrichies en oxygène 18.

c) Origine et mouvement des masses d'air sur l'Aïr:

L'Aïr se situe géographiquement à la limite d'influence de la mousson guinéenne et, normalement, au nord du trajet suivi par les lignes de grains sahéliennes (Joseph et Aranyossy, 1989). Mais certains auteurs (Leroux, 1983, Rozanski et al, 1993-94) suggèrent que les reliefs pourraient donner au JEA (Jet d'Est Africain \approx 500-800 mb) un caractère ondulatoire qui, au contact de la mousson, engendrerait des zones d'instabilité, dont certaines à l'origine des lignes de grains. L'imagerie infrarouge météosat seuillée (-40°C) montre en effet (B.Guillot et Carn, 1988) la naissance, sur l'Azaouak, de telles lignes d'instabilité, dont l'Aïr serait le catalyseur.

Il est vraisemblable, en fait, qu'une majorité de pluies de ce milieu aient pour origine les masses d'air du golfe de Guinée, en liaison avec une dynamique plus ou moins marquée des jets d'est (Lambergeon et al., 1981; Dhonneur, 1985; Fontaine et Pérard, 1986; Fontaine, 1989; Janicot, 1990) JEA et JET (Jet d'Est Tropical \approx 200-300 mb). La thèse de l'arrivée en altitude, avec le JEA (De Félice et al 1982; Joseph et al, 1989; Mahé, 1992), de masses humides, issues de la mousson indienne, est encore controversée (Rozanski et al, 1994) et reste de toute façon peu probable à cette latitude, compte tenu des obstacles rencontrés :

- . assèchement imposé par le franchissement du Rift à plus de 3000 m d'altitude,
- . aridité des vastes espaces soudano - tchadiens traversés.

Par contre, la théorie (Cadet et Nnoli, 1987) d'un apport, par le JEA, d'humidité en provenance d'Afrique centrale (donc de l'Atlantique), en relais avec la circulation méridienne de Hadley, présente l'avantage de ne pas aller à l'encontre de la figure 4-A.4 qui suggère l'origine commune des masses d'air précipitantes de l'Aïr (cf fig.1-A.6).

d) Variabilité interannuelle et mécanismes pluviogènes:

La qualité de la relation qui lie la majorité des pluies annuelles d'Azal en bordure méridionale du massif, à celles d'Aoudéras situé à l'intérieur (fig.4-A.7), et celle qui lie l'oxygène 18 au deutérium (fig.4-A.4), portent à penser que les phénomènes pluviogènes du massif correspondent, la plupart du temps, au même type. Quelques points mettent cependant en évidence l'atypie de certaines années (1982 et surtout 1988 et 1990).

Alors que la relation habituelle, liant les quantités précipitées aux deux postes, fait ressortir l'importance de l'altitude par rapport à la continentalité (fig.4-A.7), 1988 et plus encore 1990, présentent une tendance inverse. Cette similitude de comportement laisse supposer que le mécanisme des pluies de ces deux hivernages pourrait être le même; d'autant que le

nombre d'événements et les hauteurs précipitées sont identiques à Azel. Isotopes et paramètres climatologiques démontrent qu'il n'en est rien .

Sur la figure 4-A.5 les teneurs en oxygène 18 des pluies de 1988 apparaissent plus appauvries que celles de 1990. Ce phénomène montre donc que si toutes les pluies de l'Air ont la même origine, comme le suggère la figure 4-A.4, les conditions de précipitation sont différentes au cours des deux années; qu'il s'agisse de phénomènes de condensation, d'échanges en cours de chute ou de recyclage.

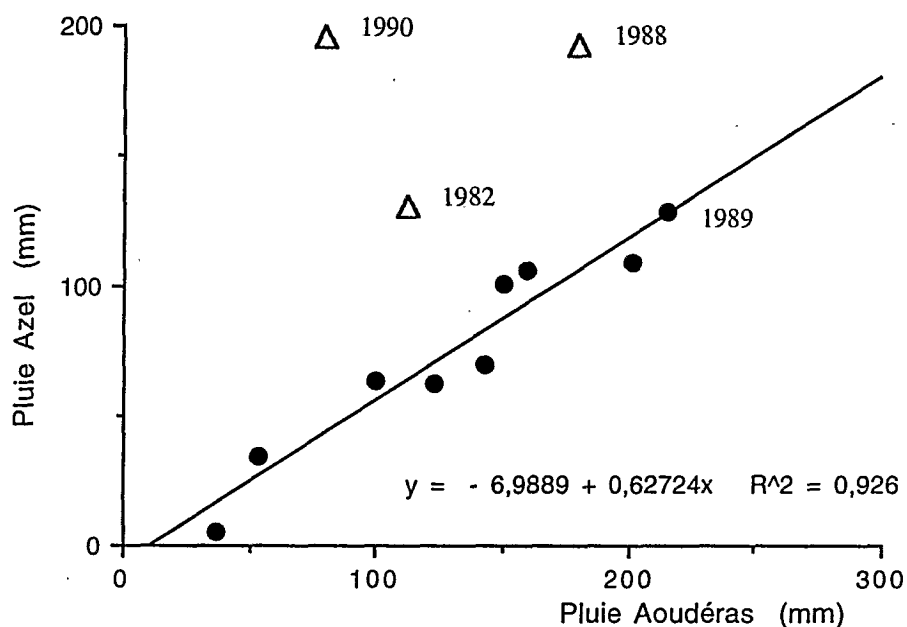


Fig. 4-A.7 Relation des pluies annuelles d'Azé et d'Aoudéras entre 1979 et 1990.

Les observations de la station météorologique d'Azé, et en particulier thermogrammes et pluviogrammes ont permis la mise en relation des teneurs en oxygène 18 des pluies et de leurs températures estimées d'équilibre. L'annexe 4-A.II,8 reproduit le thermogramme de la période du dix au quinze août 1990, durant laquelle les épisodes pluvieux se sont succédés. Cet enregistrement permet d'observer, outre l'amplitude thermique journalière supérieure à 20°, la brièveté et la régularité des pluies de fin d'après midi (entre 17 et 18 heures, le plus souvent). Cette régularité souligne le caractère orageux des précipitations qui apparaissent liées aux convections résultant des accumulations énergétiques diurnes. La chute brutale et importante (jusqu'à 30 degrés le 10/8) de température, qui accompagne la pluie, souligne l'intensité de l'évaporation responsable de la consommation cumulative d'énergie calorifique.

En fin d'averse, la saturation de la colonne précipitante étant réalisée, la température remonte rapidement pour se stabiliser en équilibre avec la tension de vapeur du milieu.

Ce sont ces températures de stabilisation et les humidités relatives correspondantes qui ont été utilisées dans les relations avec l'oxygène 18 qui suivent; et non pas les valeurs des tableaux 1 et 5 de l'annexe 4-A.II,1 qui sont celles des relevés météo à 18 heures de la station d'Azé. Sur le thermogramme les flèches précisent le lieu de lecture graphique de la "température

d'équilibre". La valeur de l'humidité relative, enregistrée parallèlement, est rappelée, de même que la quantité précipitée et la durée de l'averse.

La relation, oxygène 18 - "température à l'équilibre", des figures 4-A.8 et 4-A.9 montre que les conditions de condensation, et ou, d'échange en cours de chute, peuvent être différentes d'une année à l'autre:

- En 1988 (fig. 4-A.8) la majorité des pluies, assez appauvries ($\delta^{18}\text{O} < 0$) s'effectuent entre 25 et 28° C.

- En 1990, les pluies sont plus enrichies ($\delta^{18}\text{O} > 0$) et les températures au sol - que l'on sait étroitement corrélées avec celles de la base des nuages pluvio-gènes (Dansgaard 1964, Fontes 1976, Gonfiantini 1995) - sont inférieures de 5° C en moyenne à celles de 1988.

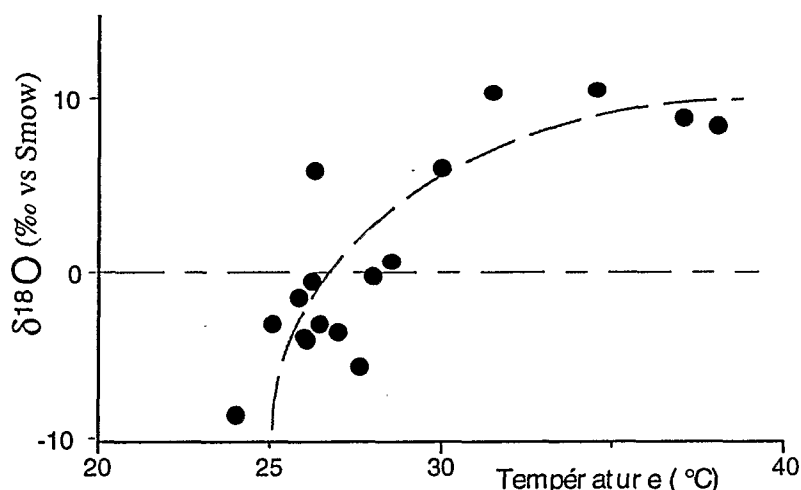


Fig. 4-A.8 Oxygène -18 des pluies et température d'équilibre de l'atmosphère à Azel en 1988.

En 1990 les températures au sol, plus basses, sous entendent des altitudes de condensation plus élevées, et ou, qu'en cours de chute les échanges ont été plus importants; ce qui suppose une sous-saturation plus prononcée de l'environnement de la colonne précipitante.

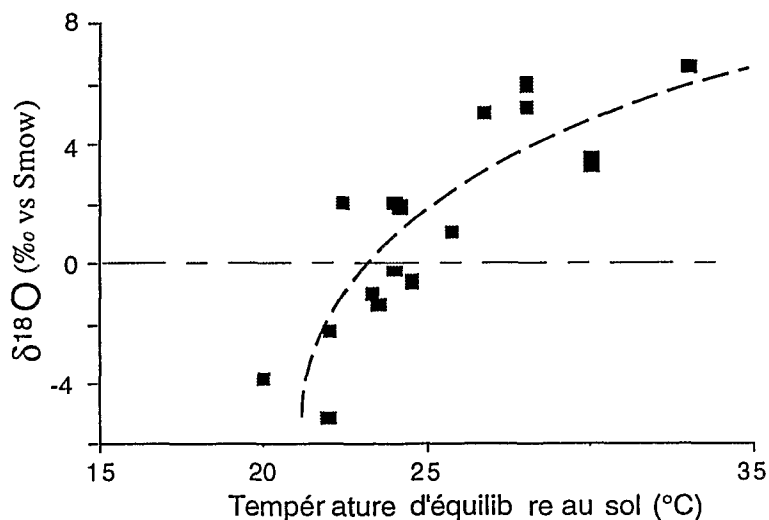


Fig. 4-A.9 Oxygène -18 des pluies et température d'équilibre de l'atmosphère à Azel en 1990

De même, la relation entre les teneurs en oxygène 18 des pluies et l'humidité relative de l'air montrent, qu'en 1988 (fig.4-A.10), les pluies appauvries correspondent à une plage d'humidité relative assez étendue, entre 70 et 100 %; alors qu'en 1990 (fig.4-A.11) ces mêmes pluies, nettement moins nombreuses, n'existent que pour des humidités relatives proches de la saturation (entre 95 et 100 %).

La figure 4-A.12 montre qu'une relation existe entre l'humidité relative et la quantité d'eau précipitée. En dessous de cinq millimètres, l'atmosphère même des précipitations reste sous saturée ($U < 80\%$); les gouttes de pluie sont soumises à évaporation en cours de chute.

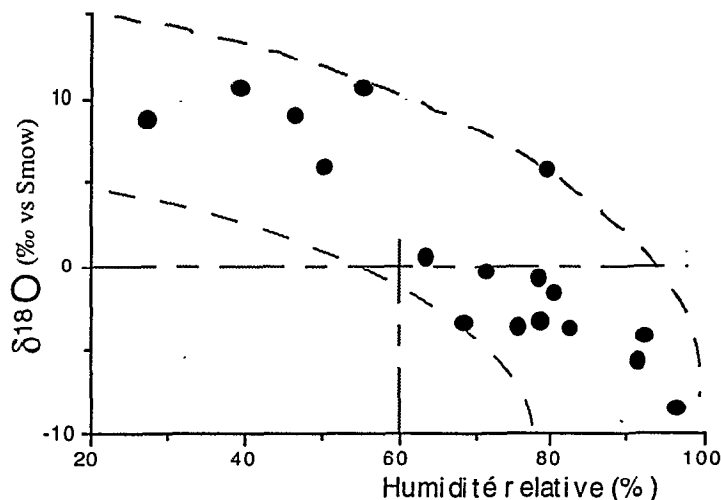


Fig. 4-A.10 Oxygène - 18 des pluies et humidité relative de l'atmosphère à Azel en 1988

Ce n'est qu'à partir de 10 mm que l'humidité atmosphérique supérieure à 90 % semble mettre les précipitations à l'abri du phénomène.

En 1988 la proportion de pluies appauvries dépasse 50 %. Ces pluies traversent une atmosphère où l'humidité apparaît peu sélective vis à vis des teneurs isotopiques, et où les températures restent élevées à l'équilibre. Ces conditions correspondent à celles de la mousson au sein de laquelle les altitudes de condensation et les échanges liquide-vapeur ultérieurs sont plus modérés.

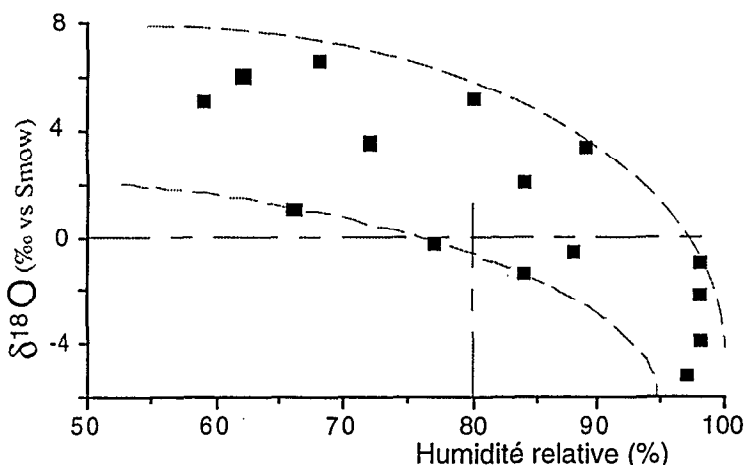


Fig. 4-A.11 Oxygène - 18 des pluies et humidité relative de l'atmosphère à Azel en 1990.

L'imagerie satellitaire infrarouge (Lahuec et Carn, 1988) confirme la présence en deuxième et troisième décade d'août surtout, de fortes activités convectives jusqu'à 18° de latitude nord sur l'Aïr, se traduisant par l'apparition de pourcentages d'occurrences de nuages à sommets froids (température $\leq -40^{\circ}\text{C}$) supérieurs à 15 % (fig. 4-A.13) pour un nombre d'images N de 165.

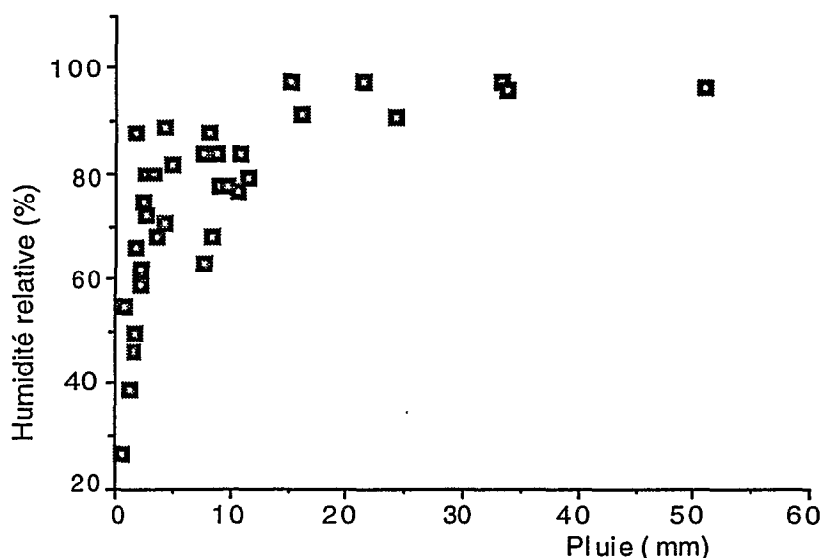


Fig. 4-A.12 Humidité relative et hauteur des précipitations à Azel entre 1988 et 1990.

L'isotherme 39° qui est un bon indicateur de la position du FIT est repoussé, dès juillet, au cœur du massif, à cette même latitude de 18° Nord; et le front de convection remonte jusqu'à plus de 20° Nord en troisième décade d'Août.

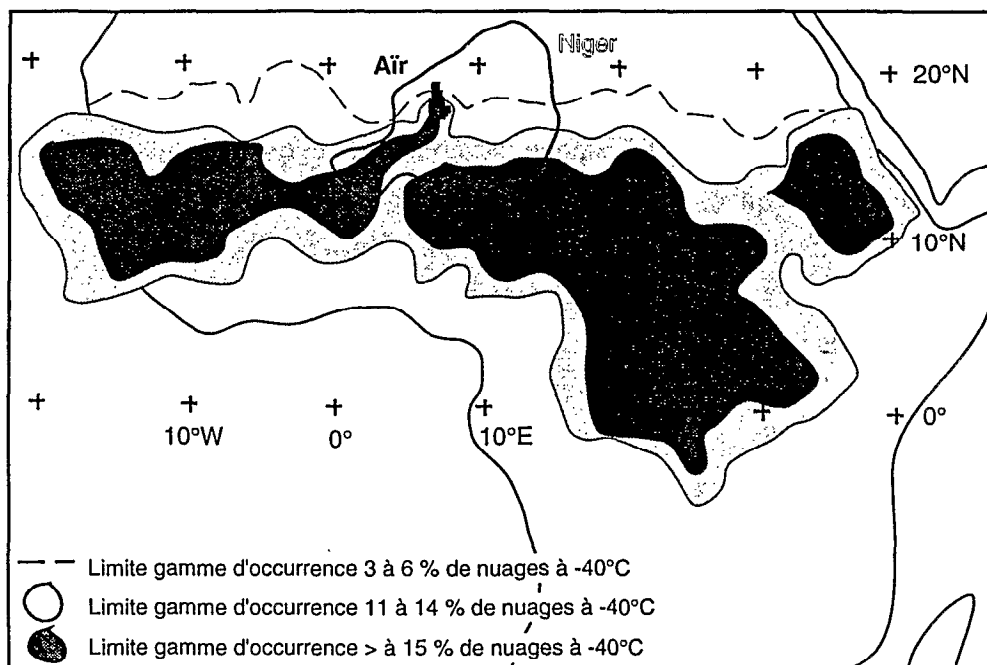


Fig. 4-A.13 Activité convective durant la troisième décade d'août 1988 sur l'Afrique tropicale (d'après Lahuec et Carn; Im. IR Météosat)

Si on retrouve l'isotherme 39° à une latitude équivalente en août 1990, les occurrences notables de nuages à sommets froids sont absentes sur l'Aïr (Lahuec et Carn, 1990). La figure 4-A.14 qui présente les occurrences (sur 180 images) de la meilleure décade de l'hivernage (la première du mois d'août) sur la région nord du Niger, le montre bien.

Les températures plus basses au moment des événements signalent des condensations de plus haute altitude (fig.4-A.9). Les précipitations appauvries sont minoritaires, et les humidités relatives, très sélectives vis à vis des teneurs isotopiques, montrent qu'en 1990 les pluies ont été plus soumises à évaporation dans une atmosphère moins saturée.

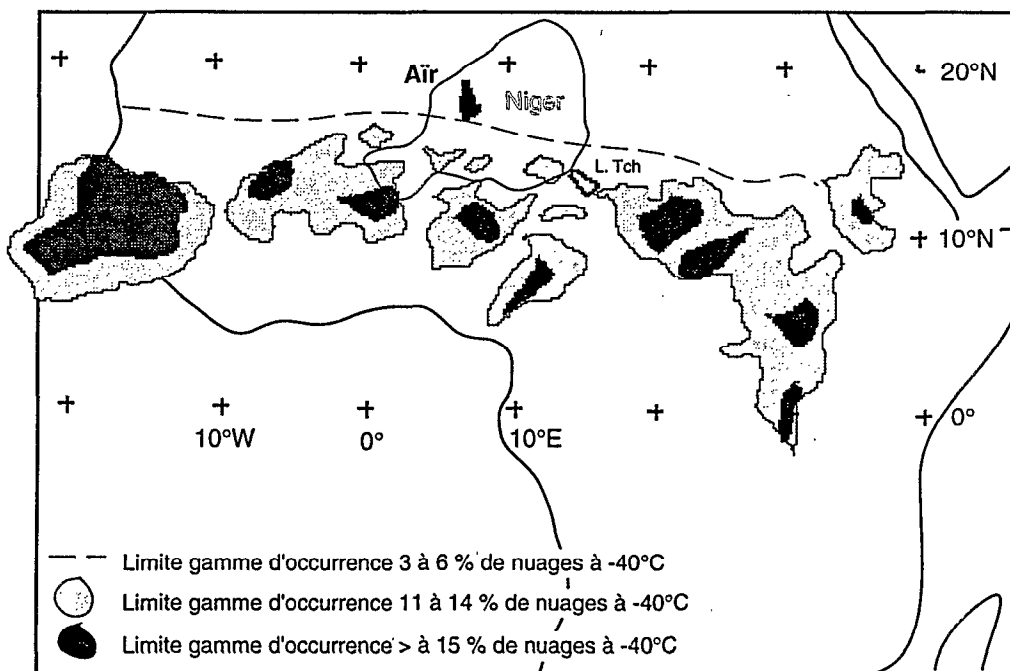


Fig. 4-A.14 Activité convective durant la première décade d'août 1990 sur l'Afrique tropicale (d'après Lahuec et Carn; Im. IR Météosat)

Si la position du FIT ne semble donc pas constituer une condition sélective des types d'événements (Cîteau et Mahé, 1991), la dynamique de la mousson, apparemment liée à celle des courants Jets, qui se traduirait sur l'Aïr par un coin humide de plus ou moins grande épaisseur, pourrait être l'explication des signatures isotopiques différentes:

– A conditions de convergences équivalentes, un coin épais produirait des ascendances modérées, car l'humidité relative assez élevée permettrait aux condensations de s'effectuer rapidement. Les précipitations qui en seraient issues échangeraient relativement moins, en cours de chute, pour les mêmes raisons de saturation. Ces conditions pourraient être celles de 1988.

– Un coin de faible importance obligerait les masses d'air, plus pauvres en vapeur, à monter beaucoup plus haut pour condenser. La reprise évaporatoire serait alors importante dans la colonne sous-jacente, au moment de la précipitation.

Malgré ces conditions moins favorables, 1990 se présente comme une année excédentaire, et cela conduit à envisager d'autres sources d'alimentation pour les pluies des années où la mousson est peu dynamique:

L'existence d'advections, en altitude, d'air d'origine polaire, dont certains auteurs (Leroux 1983) parlent comme facteur stimulant la formation des lignes de grains, pourrait être favorisée par l'apparition au sol de basses pressions consécutives aux ascendances d'origine radiative. Ces advections froides, en abaissant les altitudes de condensation, pourraient optimiser la capacité de masses d'air affaiblies.

L'existence d'un JEA dynamique, qui correspond à un flux de mousson déficient, pourrait (Cadet et Nnoli, 1987; Mahé, 1992; Mahé et Citeau, 1993) aussi apporter une contribution notable des masses d'air centre-africaines recyclées au dessus de la forêt équatoriale. A moins que ce Jet, en canalisant depuis l'océan indien les gouttes froides issues du pôle, via l'Himalaya, ne viennent régénérer, au centre du massif de l'Aïr, les masses d'air appauvries, mais vigoureusement ascendantes.

CONCLUSION:

L'Aïr, comme les autres massifs nord-sahéliens, se situe à la limite d'influence de la mousson guinéenne dont il semble, si l'on se réfère au tracé des isohyètes régionales, régénérer les masses d'air, très affaiblies à cette latitude.

L'influence de l'évaporation, exprimée par la relation Deutérium - oxygène 18, qui place les couples sur une droite située en dessous de la droite météorique mondiale, est malgré tout sensible sur la plupart des pluies.

Si les quantités précipitées sont encore sous l'influence, dans le sud du massif, de l'altitude, l'appauvrissement très rapide des masses d'air avec la latitude, sous l'effet d'une aridité croissante, explique la signature isotopique anormale qui est constatée sur cette partie de l'Aïr ; altitude et latitude finissant par produire un enrichissement isotopique.

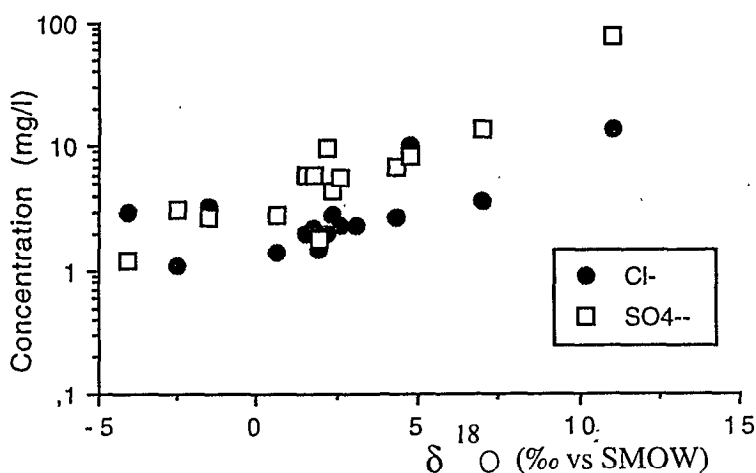


Fig. 4-A.15 Minéralisation et Oxygène-18 à la station d'Aoudéras en 1990

Les figures de l'annexe 4-A.II,9 qui mettent en relation sur le bassin du Téloua la minéralisation caractéristique de l'évaporation (chlorures-sulfates) et l'oxygène-18 des précipitations de l'année 1990 montrent que les pluies les plus négatives sont aussi les moins ionisées. Elles relèveraient donc, sur cette partie sud du massif, de phénomènes de recyclages

successifs, plutôt que de convections de haute altitude, comme le montre la figure 4-A.15 qui souligne la relation à Aoudéras.

A Azel, la relation est assez médiocre, en particulier pour les pluies négatives, mais plus avant dans le massif, de Dabaga à Aoudéras, la liaison s'affine, soulignant l'effet de la latitude sur l'évaporation.

Un retour à l'effet de continentalité, au cœur du massif, qui voudrait que l'appauvrissement du réservoir s'effectue progressivement par prélèvement des isotopes les plus lourds, lors des pluies successives, n'est guère concevable. Cet effet, déjà partiellement occulté, au vent des premiers reliefs, par les phénomènes de reprise évaporatoire, ne peut qu'apparaître plus affaibli encore, sous leur vent, en raison de l'effet de fœhn. L'appauvrissement constaté n'est donc, vraisemblablement, que le résultat de condensations de plus hautes altitudes, suscitées par l'effet radiatif intense des surfaces métamorphiques altérées, et des surfaces volcaniques à faible albédo.

L'étude de la variation de la teneur en oxygène 18 en fonction des paramètres climatiques de base, température et humidité relative, a donc permis de distinguer deux types de précipitations d'hivernage; que rien dans les totaux, ni dans les répartitions, ne permettait de discerner. Le médiocre flux de mousson de 1990 est donc aussi à l'origine d'une bonne pluviosité sur l'Aïr, en liaison sans doute avec d'autres facteurs tels les apports d'Afrique centrale du JEA, ou les advections d'air polaire d'altitude.

III. APPLICATION AUX EAUX DU TELOUA

1) Les faciès chimiques et isotopiques (Fritz et Fontes, 1980):

a) Les eaux souterraines:

La nappe alluviale du Téloua (fig. 4-A.16) a fait l'objet de prélèvements à Azel au cours de la dernière campagne hydrologique 1990, dans le but de suivre l'évolution des teneurs chimiques et isotopiques dont la connaissance est utile pour la séparation des écoulements.

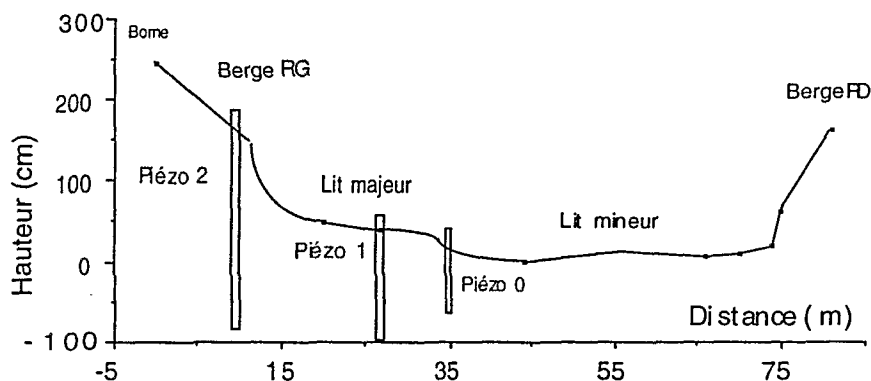


Fig. 4-A.16 Profil en travers du Téloua à Azel, positions piézométriques

Le forage des trois piézomètres dans les sables alluviaux et la berge du kori a été retardé, en début de campagne, par une succession de petites crues qui firent passer 700 000 m³ à Azel avant le 24 juillet. Le contrôle réel de la nappe ne commença que le 26.

À Azel le faciès physico-chimique des eaux alluviales (An. 4-A.III,1) apparaît tout à fait conforme aux observations réalisées au cours des années "80" :

– Le pH :

La plupart des eaux ont un pH légèrement acide (6 à 6,5) qui correspond à celui des pluies récemment infiltrées. Quelques valeurs alcalines, entre 8 et 9, qui résultent vraisemblablement d'une mise en équilibre avec le système calco-carbonique, sont observées, sans que l'on puisse expliquer la cause de cette alcalinité;

.temps de séjour dans le milieu entre deux écoulements,

.ou conditions de pH déjà différentes au moment de l'infiltration (eaux de ruissellement ou d'inféro-flux provenant d'autres parties du bassin).

– La conductivité ramenée à 20° est exprimée en micro siemens (μs);

ses valeurs restent modérées entre 100 et 150 μs pour la majorité des eaux des piézomètres "0" (contrôlant la nappe sablo-graveleuse du lit mineur, entre 0 et 0,70 m), et "2" (contrôlant la nappe de berge, beaucoup plus limoneuse, jusqu'à une profondeur de 2,50 m).

Les valeurs du piézomètre "1", qui permet d'observer la zone d'épendage sablo-limoneuse du "lit majeur" sur une hauteur de 1,50 m, sont plus élevées, entre 200 et 300 μs en moyenne (jusqu'à près de 500 μs le 27 août).

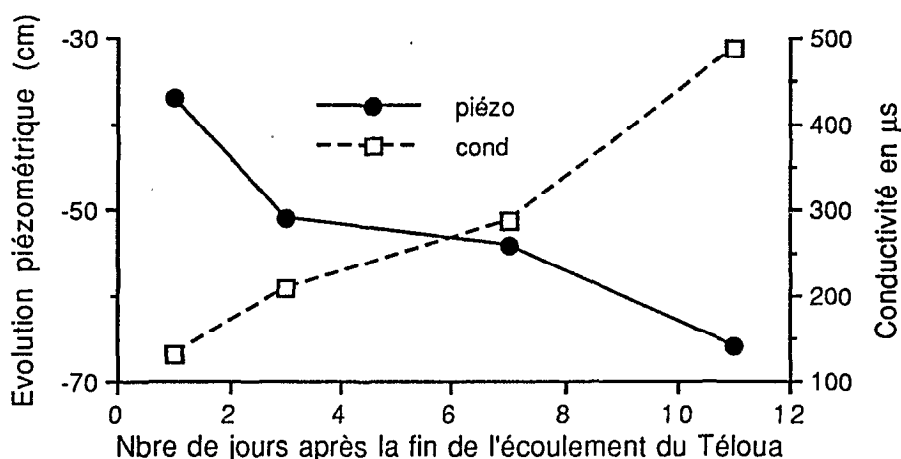


Fig.4-A.17 Conductivité et piézométrie de la nappe du lit majeur (piézo "1") à AZEL entre le 17/8 et le 27/8/90

Cette valeur marque d'ailleurs l'aboutissement d'une évolution que l'on peut suivre sur ce piézomètre depuis la fin de l'écoulement de la crue du 14 au 16/8 (fig.4-A.17) et qui n'est

pas liée à l'évaporation, l'augmentation de la minéralisation ne se traduisant pas par une augmentation, dans la même proportion, des différents éléments, (fig.4-A.18).

C'est donc bien d'une hydrolyse progressive des éléments de la matrice du lit majeur dont il s'agit (Delmas, 1979); conclusion à laquelle Roussin-Bariac (1985) était arrivée lors de ses travaux sur la cuvette d'Agadez.

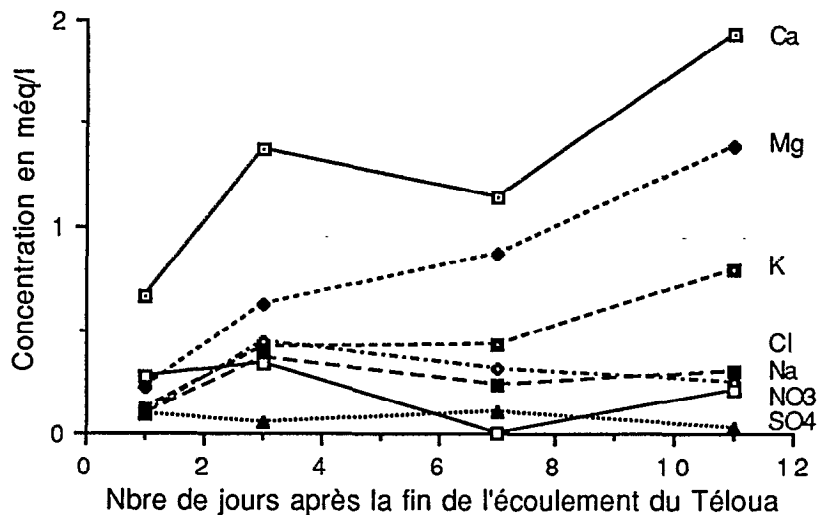


Fig.4-A.18 Evolution de la minéralisation de la nappe du lit majeur à AZEL du 17/8 au 27/8/90

Sur cette figure trois éléments montrent une particulière sensibilité à l'hydrolyse:

- . le calcium qui, dans le milieu de l'Air, est lié aux granites plagioclases;
- . le magnésium dont l'origine se trouve dans les micas blancs (phengite)
- . le potassium qui relève des feldspaths potassiques, et ou des basaltes de la tête du bassin (mont Todgha).

La concentration des autres éléments est peu variable, en particulier celle des sulfates

– La température:

Lorsque les mesures physicochimiques ont pu être réalisées simultanément aux trois piézomètres, il est intéressant d'observer leur évolution de l'un à l'autre, (fig.4-A.19) comme pour la conductivité:

Les eaux du piézomètre "0", à proximité de la surface, présentent des températures plus faibles que celles du piézomètre "1", bien qu'étant les plus soumises au rayonnement diurne très actif (cf. Chap 2, A, II, 4). L'évaporation qui nécessite une certaine quantité d'énergie pour se développer, prélève, sous forme calorifique, dans le milieu le plus exposé à son action; la partie superficielle de la nappe.

Les températures relevées dans le piézomètre "2", contrôlant la zone externe du lit majeur (entre 1,5 et 2,5 m), sont les plus basses. Les eaux de cette partie de la nappe, qui représentent une masse plus importante, relativement protégée des fluctuations extérieures, sont proches de la valeur moyenne atmosphérique. La température moyenne des eaux du piézo"2"

(29,3 °C) apparaît effectivement proche de la température moyenne de l'air à Azel, calculée sur les douze derniers mois (29,0 °C); annexe. 2-A.I.1.

Les températures relevées sur le piézomètre "1" sont plus élevées, d'environ un demi degré centigrade, que celles des autres piézomètres. Cette zone de la nappe, encore proche de la surface, concentrant les effets du rayonnement, est le lieu privilégié d'échanges thermodépendants, comme l'hydrolyse des minéraux (Fritz B., 1975); les autres paramètres physico-chimiques le confirment aussi.

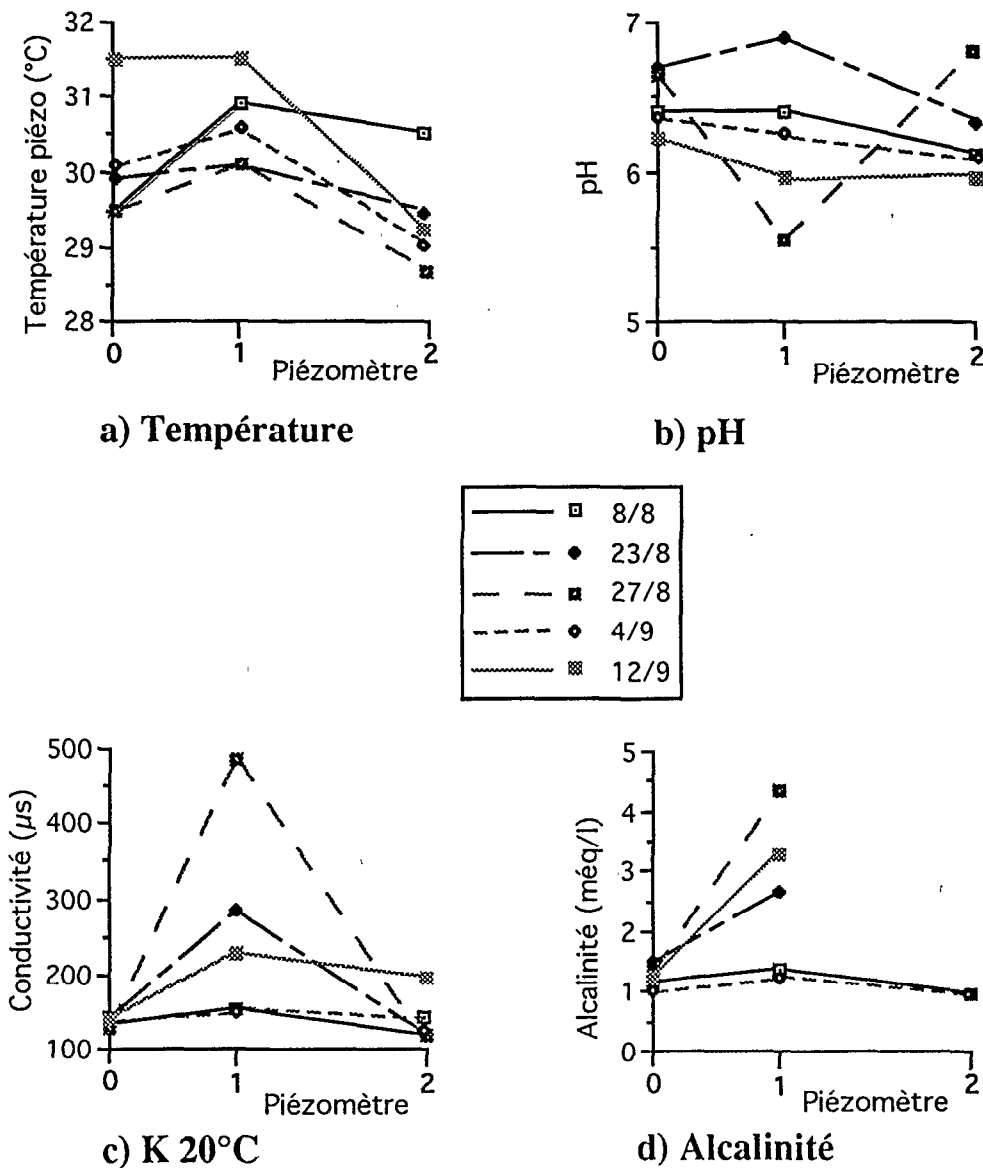


Fig. 4-A.19 Variation des facteurs physico-chimiques, en fonction de la situation piézo, dans la nappe alluviale du kori Téloua à AZEL en 1990.

– L'alcalinité est représentée, dans le cas de ces eaux naturelles proches des eaux de surface, par la teneur en bicarbonate (meq.l⁻¹). Les valeurs systématiquement plus élevées du piézomètre "1" traduisent, comme pour les autres paramètres physicochimiques, le phénomène

d'hydrolyse signalé précédemment (et bien que les valeurs du piézomètre "2" n'aient pas toujours pu être contrôlées).

Les observations et interprétations concernant les variations de température et d'alcalinité des eaux du piézomètre "1" auraient pu être présentées, de la même manière, pour la conductivité, et de façon plus nuancée pour le pH. Le faciès chimique de la nappe est déterminé à partir des valeurs de l'annexe 4-A.III,2 qui présente l'ensemble des concentrations (en mg.l⁻¹) obtenues sur les prélèvements piézométriques de l'hivernage 1990.

Les fortes valeurs en nitrates prévalent, parmi les anions, avec celles des bicarbonates. Les cations sont dominés par les valeurs de calcium; la silice, compte tenu de l'environnement cristallin de l'Air, présente également une teneur importante.

L'annexe 4-A.III,3 présente les concentrations en méq/l et la balance ionique qui permet de vérifier la qualité des analyses. Les mauvaises balances obtenues sur un grand nombre d'échantillons, malgré la répétition de certaines analyses par des laboratoires différents (LHGI, ORSTOM Bondy, INRA Thonon les Bains) suivant des techniques variées (chromatographie en phase liquide, ou spectrophotométrie d'absorption atomique) ont amené à s'interroger sur l'origine de ce déséquilibre (An. 4-A.III,38). Les fortes valeurs de nitrates, vraisemblablement liées à la présence du cheptel ovin et caprin dans le lit des koris (y compris durant le saison des pluies) entre les écoulements, ont été retranchées de la somme des anions, à titre expérimental, pour un nouveau calcul de balance. Le résultat obtenu, sans être totalement satisfaisant (certaines balances restant en déséquilibre), traduit dans la plupart des cas un retour à la normale (-10% < balance < +10%).

Il est vraisemblable donc, que le déséquilibre constaté des balances soit bien lié à l'excès en nitrates zoogènes, dont l'importance, et surtout la présence très récente, n'en a pas permis une assimilation suffisamment rapide par le milieu (TAC réalisé in situ).

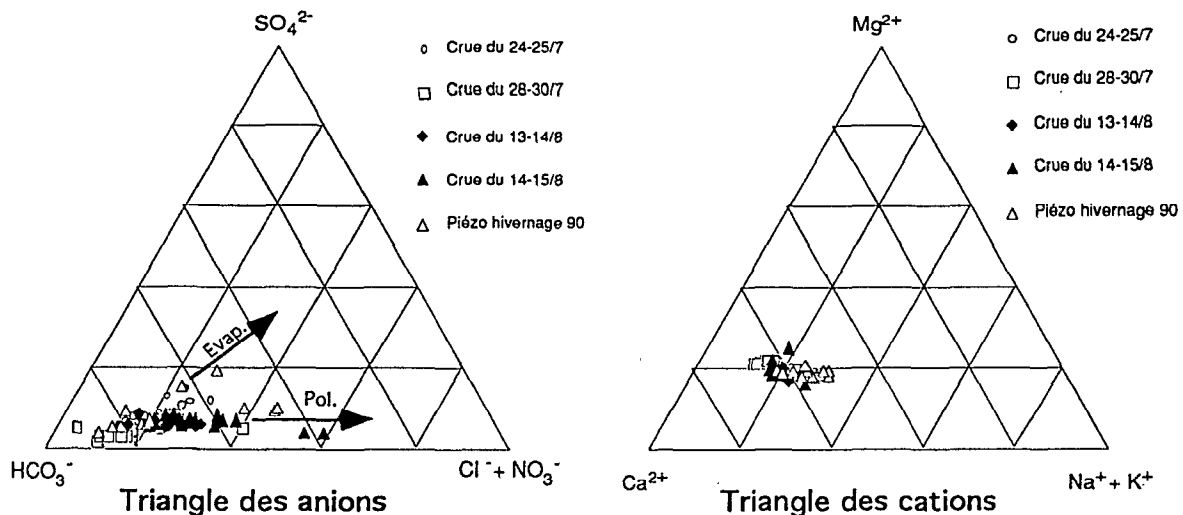


Fig. 4-A.20 Composition chimique des eaux de crues et de nappes du Téloua à AZEL en 1990

La représentation triangulaire (fig. 4-A.20) permet de visualiser le faciès des eaux de la nappe qui, comme celles d'écoulements, apparaissent bicarbonatées calciques.

Le triangle des anions montre deux tendances; une d'évaporation, sur la médiatrice des pôles sulfates-chlorures; l'autre de pollution vers les nitrates. Ces deux tendances correspondent à une même période de l'hivernage; celle qui suit le premier écoulement important du bassin, la crue du 24 au 25 juillet de 3 millions de m³. Les lessivages importants occasionnés par cette crue ont entraîné vers le lit du kori, et donc sa nappe alluviale, une masse importante de sels que la reprise évaporatoire, post écoulement, aussi limitée soit-elle, fait ressortir. Les fortes valeurs de nitrates de la nappe sont issues de ces mêmes lessivages soumis à évaporation.

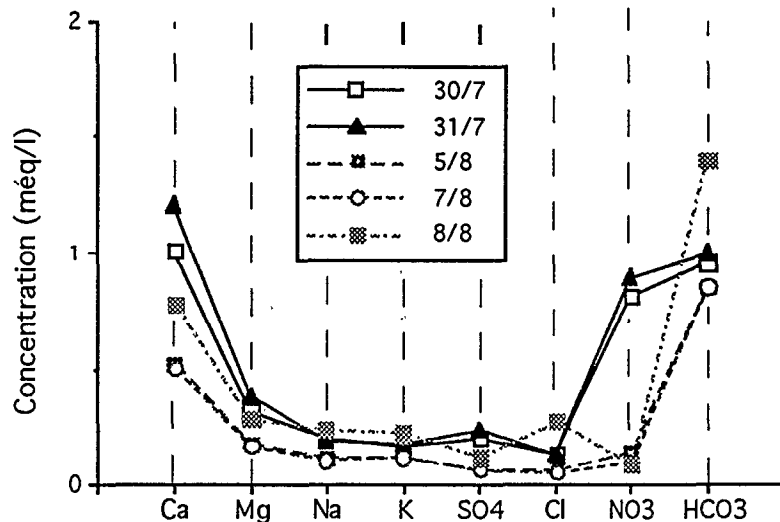


Fig. 4-A.21 Diagramme type Schoeller des eaux de la nappe alluviale inter-cruée (30/7 au 8/8) du Téloua à Azel en 1990

Le diagramme type Schoeller de la figure 4-A.21 présente les résultats sous une autre forme; où on y distingue en particulier:

- .les concentrations dominantes du calcium et des bicarbonates,
- .le pôle de pollution des nitrates au début de la période d'observation de la nappe qui correspond à une fin d'écoulement sur le Téloua,
- .enfin la reconcentration dans des proportions différentes résultant des phénomènes d'hydrolyse de tous les éléments, de même que le développement d'un léger pôle d'évaporation (augmentation des chlorures) en fin de séquence d'observation.

Le faciès isotopique des eaux de la nappe est figuré en 1990 par les données de l'annexe 4-A.III,1 qui apparaissent cohérentes avec celles déjà présentées par les études antérieures (Roussin-Bariac, 1985; Aranyossy et Joseph, 1985):

– Les valeurs du piézomètre "0" traduisent des phénomènes d'échanges (fig.4-A.22). Les points de la relation deutérium - oxygène-18 se situent sur la droite d'évaporation des précipitations locales (DML), ce qui reflète l'origine de ces eaux, et leur faciès évaporé.

La pente de 4,6 traduit un phénomène d'évaporation ayant eu lieu à la surface et élimine donc l'hypothèse d'une reprise évaporatoire notable dans la Zone Non Saturée (ZNS) alluvionnaire.

Les fortes températures du sol au début de la pluie (jusqu'à 60°; cf chap. 2-A.II,4) stimulent l'évaporation (la vaporisation des premières gouttes) qui limite l'infiltration de la précipitation, et joue un rôle dans la régulation thermique et hygrosopique de l'atmosphère.

La moyenne des dix mesures d'oxygène 18 de l'hivernage ($\delta^{18}\text{O} = -1,44$) intègre à la fois des valeurs négatives, comme celles relatives aux eaux d'inféoflux qui suivent les importants écoulements de la charnière juillet-août ($\delta^{18}\text{O} = -3,47$) et des eaux beaucoup plus enrichies comme celles de fin août ($\delta^{18}\text{O} = +0,02$).

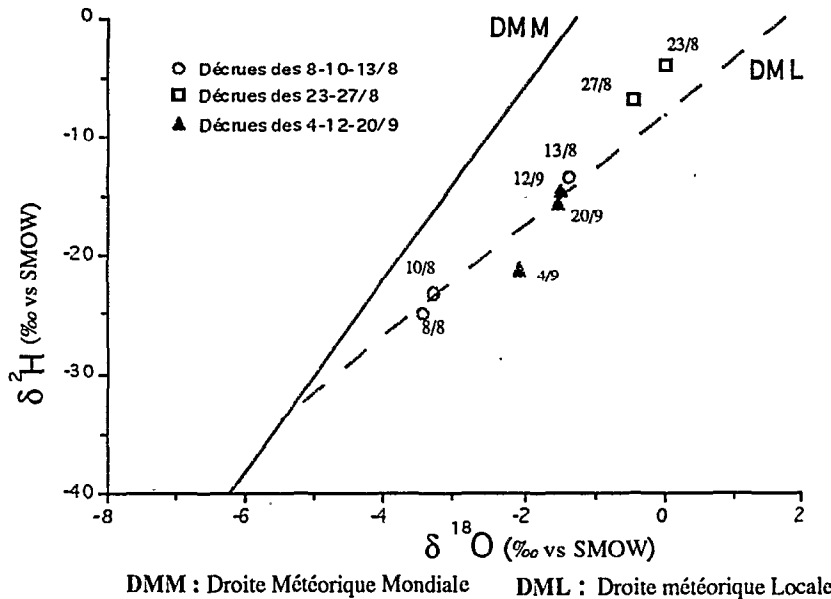


Fig. 4-A.22 Evolution isotopique des décrues successives du piézomètre "0"

Les eaux du piézomètre "0" sont en fait;

- . dans un premier temps, le reflet des derniers événements hydrométéoriques; les pluies du 3/8 à Azel (50,8 mm) avec une valeur en oxygène-18 de $-5,12 \delta$, et du 8/8 (21,5 mm) avec une valeur de $-2,13 \delta$, expliquent la valeur de $-3,47 \delta$ du piézomètre "0" le 8/8,

- . dans un deuxième temps le reflet d'échanges importants avec l'atmosphère: la proximité des eaux de l'interface sous saturée du milieu subdésertique se traduit par de très sensibles phénomènes d'enrichissement avec le temps, comme le montre, sur la figure, la variation (de 2δ) de la relation deutérium - oxygène-18 de la période du 8 au 13 août.

- Les valeurs du piézomètre "1" sont globalement plus appauvries;

Les valeurs s'alignent sur une droite de pente intermédiaire entre celle des eaux météoriques locales (DML) et celle des eaux météoriques mondiales (DMM). Les eaux de la décrue du 5 au 8 août, qui suit les importants écoulements du 23 juillet au 5 août (près de 80 % des 11 millions de m^3 de l'hivernage) présentent un faciès très appauvri (-4 à -5δ en oxygène-18). Ces eaux sont le reflet de l'effet de masse observé sur les pluies du cœur de la saison humide. Situées sur la DML, à proximité de l'intercept avec la droite mondiale, elles apparaissent néanmoins marquées par un léger processus d'évaporation, du fait du maintien, à proximité de la surface du lit alluvial, des eaux d'un inféoflux soutenu. La moyenne des douze observations de l'hivernage est de $-2,07 \delta$ pour l'oxygène-18. Mais cette valeur occulte une certaine dispersion

(de + 0,59 à - 4,62 δ), comme le montrent les observations de la période du 17 au 27 août qui suit l'importante crue du 13 au 15 (fig.4-A.23)

La première valeur ($\delta^{18}\text{O} = - 0,84$) enregistrée une trentaine d'heures après la fin de l'écoulement dans le kori, à une profondeur piézométrique de - 37 cm, présente un faciès évaporé d'eaux de décrue récemment infiltrées après un transit de surface, ou de sub-surface.

Le faciès enregistré quarante huit heures plus tard, le 19/8, à une profondeur piézométrique de - 95 cm, (qui souligne la rapidité de tarissement de la nappe alluviale), est

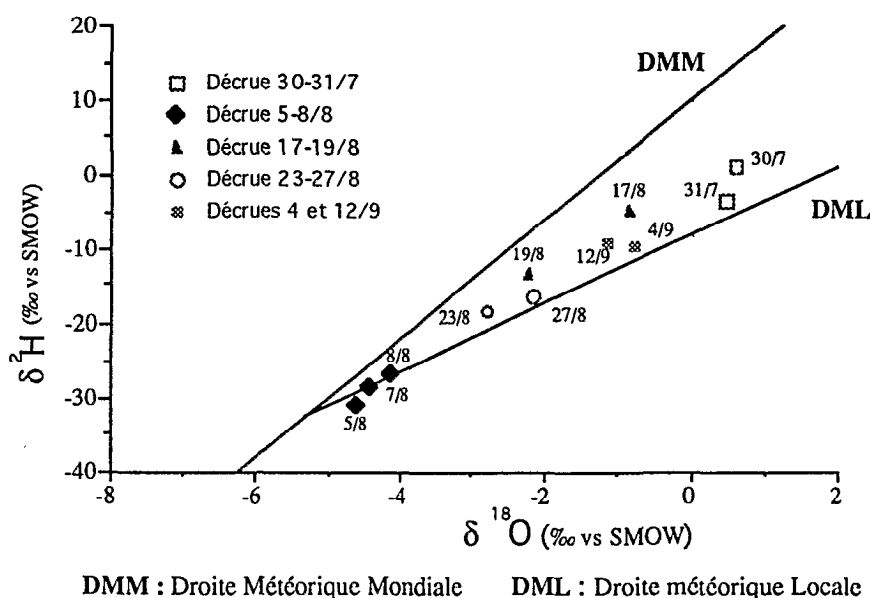


Fig. 4-A.23 Evolution isotopique des décrues successives du piézomètre "1"

nettement moins marqué par l'évaporation: $\delta^{18}\text{O} = - 2,21$. Il reflète des eaux dont la valeur moyenne se rapproche de celle des pluies sur le bassin.

Le 23/8, la valeur en oxygène-18 de - 2,79 δ est relevée à une côte piézo - 98 cm, dont la faible évolution par rapport à la précédente signale un net ralentissement du rabattement de la nappe alluviale. Elle correspond à la valeur moyenne pondérée (- 2,66 δ) des pluies antérieures supérieures à 10 mm, dont on peut penser qu'elles ont été peu soumises à évaporation.

La valeur enregistrée quatre jours plus tard, le 27/8, montre un nouvel et léger enrichissement qui peut être interprété comme étant, à une profondeur piézométrique de -110 cm, le résultat d'un mélange au contact avec la partie inférieure de la nappe où les mouvements de renouvellement à chaque crue sont plus limités.

– Les valeurs du piézomètre "2" confirment l'interprétation précédente;

Les eaux du piézomètre 2 présentent en effet un faciès tamponné. La valeur moyenne en oxygène-18 (-1,91 δ), obtenue sur six observations (entre - 175 et - 248 cm) beaucoup plus homogènes, à part la valeur du 30/7, est en légère hausse par rapport à la valeur moyenne du piézo "1" (fig.4-A.24)

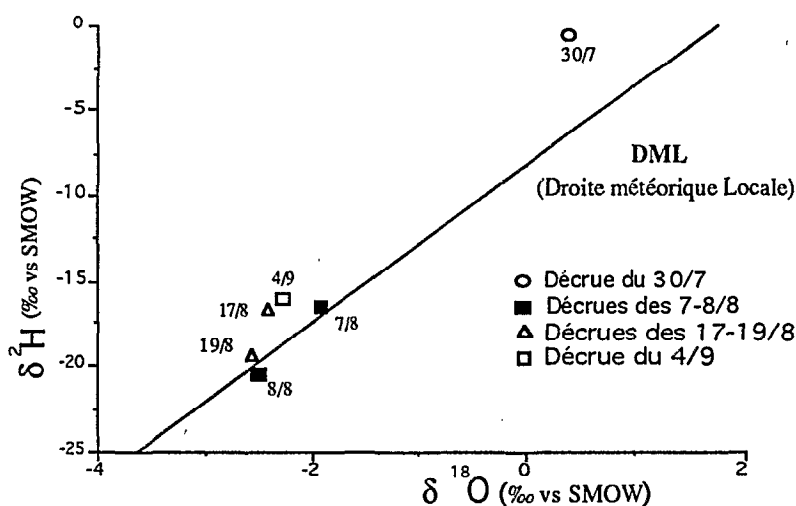


Fig. 4-A.24 Evolution isotopique des décrues successives du piézomètre "2"

b) Les eaux d'écoulement:

– L'échantillonnage des crues du Téloua au cours des trois dernières campagnes hydrologiques ORSTOM dans l'Aïr (de 1988 à 1990) a été effectué à la station d'Azél. Le but de cet échantillonnage était de mettre en évidence les relations pouvant exister entre les paramètres physicochimiques, les concentrations ioniques majeures, ou les teneurs isotopiques, et les débits d'écoulement. De la réalité et de la qualité de ces relations dépendent la mise en œuvre de la décomposition de l'hydrogramme de crue. Compte tenu des différentes contraintes de terrain; heure d'arrivée de la crue (les écoulements du haut Téloua arrivent à Azél en milieu de nuit, le plus souvent), de l'intégralité ou non du contrôle de la montée des eaux (sachant que la variabilité des phénomènes y est maximale), du bon fonctionnement des différents appareils de mesure...un certain nombre de crues échantillonnées n'ont pu être exploitées. Finalement neuf crues seulement ont été retenues; trois en 1988, deux en 1989 et quatre en 1990.

L'accroissement rapide des hauteurs d'eau en phase de crue a conduit à lier les prélèvements à la variation de la cote à l'échelle plutôt qu'à un pas de temps; le principe retenu pour la plupart des crues étant celui d'une prise d'échantillon tous les dix centimètres de cote à la montée, tous les vingt à trente à la descente. Certaines crues, à la montée très rapide, n'ont pu être contrôlées dans le premier mètre d'évolution; d'autres, à l'évolution plus lente, ont permis de resserrer les prises et de procéder à un suivi plus fin, l'écart des prélèvements pouvant être alors réduit jusqu'au centimètre. L'échantillonnage des crues importantes ($> 200 \text{ m}^3$) a produit en moyenne de 30 à 40 flacons; celui des crues modestes ($< 50 \text{ m}^3$) de 20 à 30.

Chaque prise manuelle de 200 ml d'eau, effectuée en même temps que les mesures physicochimiques de température, pH et conductivité, au pied des échelles de crue, a donc été reliée à une cote et, ultérieurement, comme toutes ces mesures, à un débit. Les flacons en polypropylène ont été remplis à refus et doublement bouchés pour éviter tout échange. L'eau recueillie est, sous 48 heures, traitée (filtration et TAC) et conditionnée dans l'attente des différentes analyses chimiques et isotopiques de laboratoire (Annexe 4-A.III,38).

– Les faciès chimiques et physicochimiques des écoulements:

.Les faciès chimiques apparaissent peu différents de ceux définis pour les eaux de nappes en 1990 (Annexes 4-A.III,1 à 18); et peu variables d'une crue, d'une année à l'autre, comme le montrent les représentations triangulaires des figures 4-A.25 et 4-A.26.

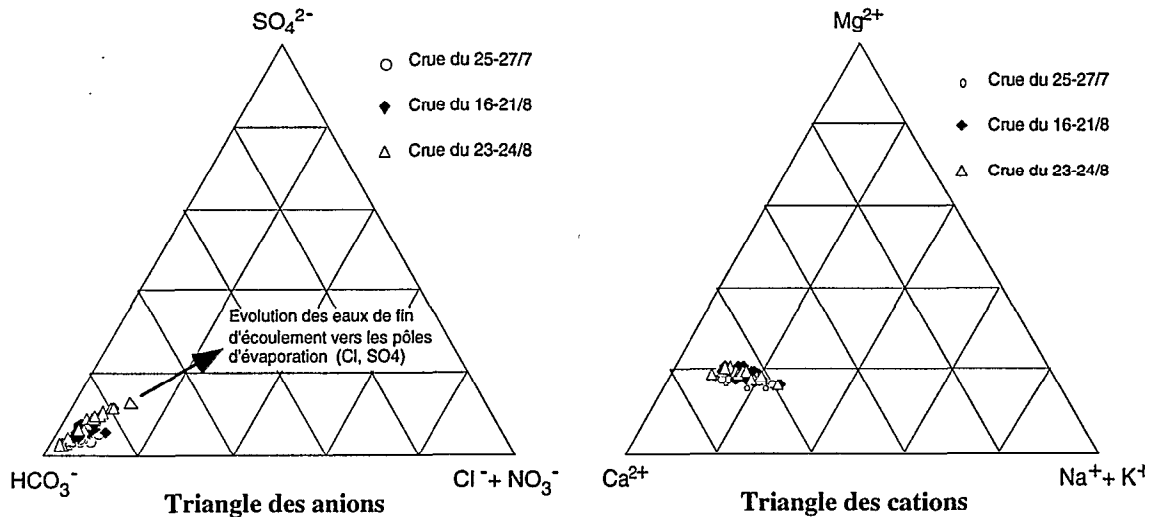


Fig. 4-A.25 Composition chimique des eaux du Téloua à Azel en 1988

Les eaux d'écoulement sont très nettement bicarbonatées calciques.

Sur le triangle des anions apparaît, au cours des trois années, un léger mais très net étirement du nuage des pourcentages de concentrations vers les pôles chlorures-sulfates qui montre qu'une partie des eaux d'écoulement a été soumise à évaporation. En 1990 (fig.4-A.20) on notait aussi ce type d'étirement, en particulier pour la crue du 14 au 15 août, mais vers le pôle chlorures-nitrates. Le tableau de l'annexe 4-A.III,16 montre que ce sont les nitrates qui étaient responsables de cette tendance, et qu'il s'agissait donc d'une pollution.

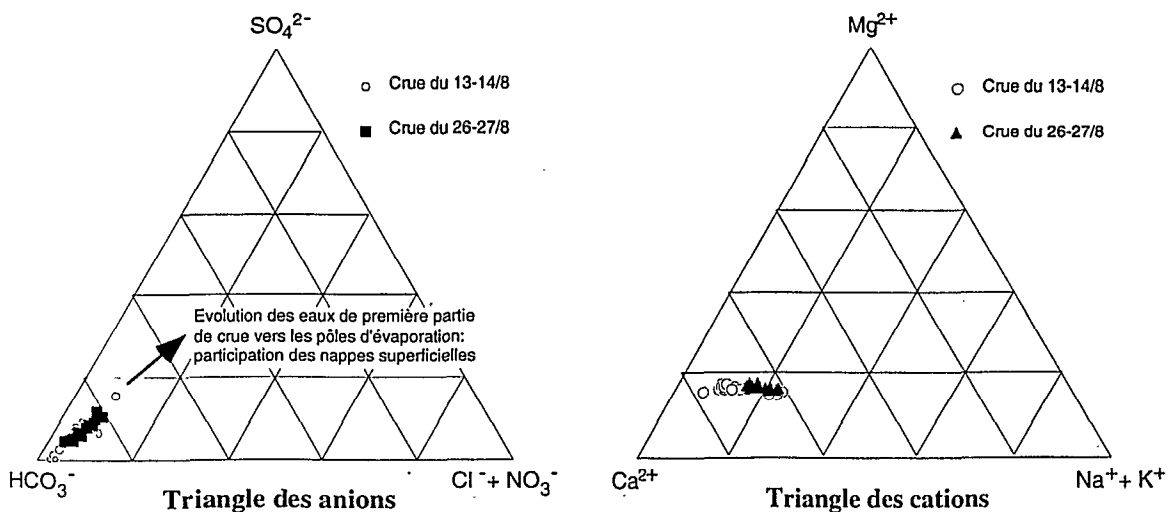


Fig. 4-A.26 Composition chimique des écoulements du Téloua à Azel en 1989

Un étirement vers le pôle sodium-potassium apparaît sur le triangle des cations. Les annexes 4-A.III,6 et 7 montrent que le potassium est le minéral dominant du tandem.

Les diagrammes de type Schœller (Annexes 4-A.III,20 à 23), qui présentent tous la même allure (fig.4-A.27), confirment que ce sont les bicarbonates qui président, avec le calcium, et dans une moindre mesure le magnésium, les solutions ioniques de ces eaux, dont la minéralisation relève bien de l'altération, par hydrolyse des feldspaths potassiques, du milieu métamorphique. Cette altération aboutit à la formation d'argiles de type kaolinite (Joseph, 1990)

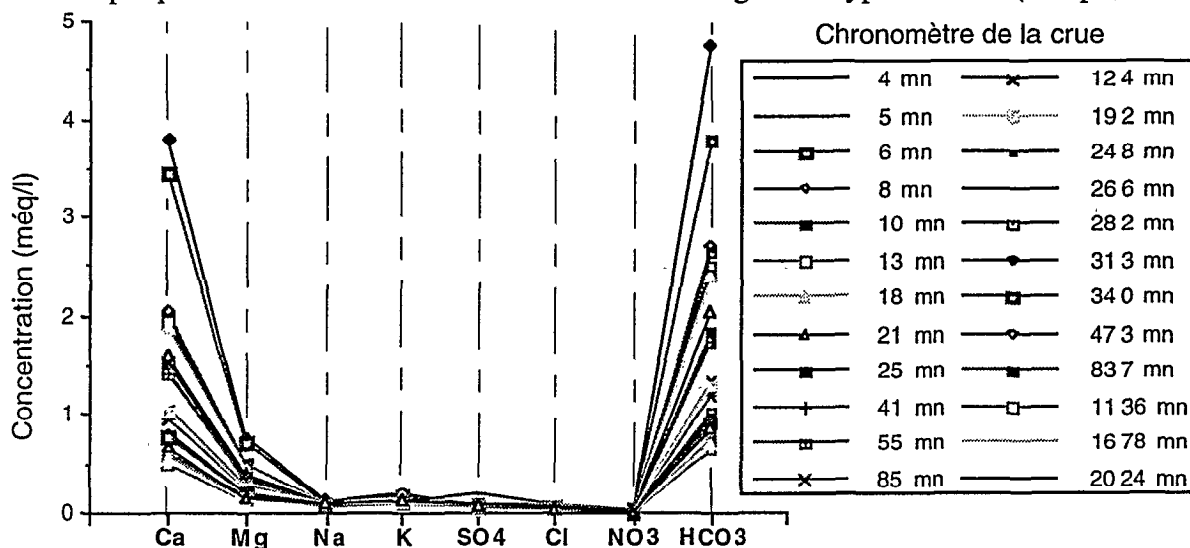


Fig. 4-A.27 Diagramme type Schœller de la crue du 13-14/8/89

Certains diagrammes montrent un pôle de pollution (NO_3) en début de crue (14-15/8/90) qui correspond à la prise en charge sur le bassin d'excréments animaux (fig.4-A.28)

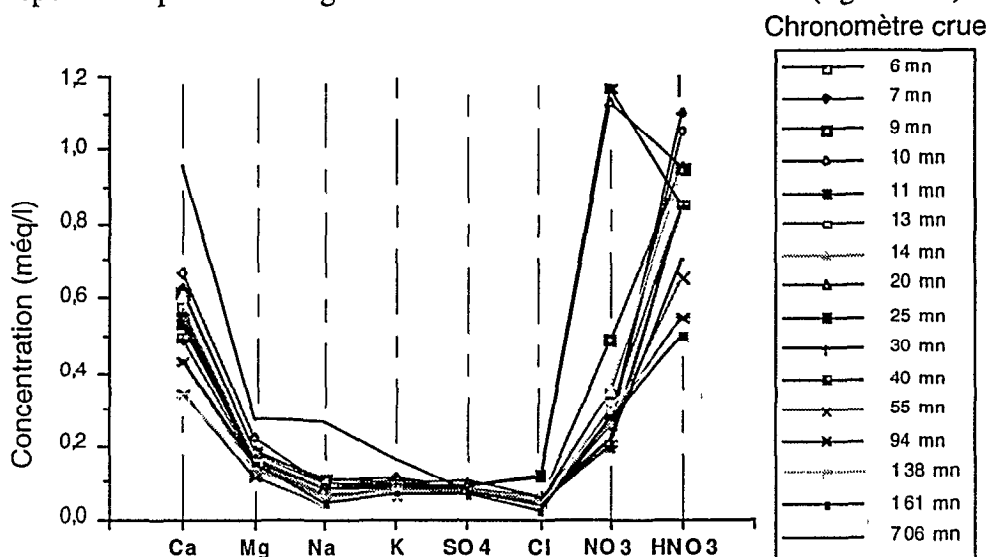


Fig. 4-A.28 Diagramme de Schœller de la crue du 14-15/8/90

Evolution des faciès en cours de crue:

Chlorures et sulfates évoluent parallèlement, l'échelle de variation des sulfates étant plus étendue (crue du 13-14 /8/89, fig.4-A.29). Sur la plupart des crues, en début d'écoulement, des pics de nitrates apparaissent, issus de ruissellements pur ou plus vraisemblablement de rejets de nappes alluviales superficielles; comme en atteste la présence simultanée de pics de chlorures caractéristiques de phénomènes d'évaporation (crues des 24-25/7/90, 14-15/8/90; fig.4-A.30).

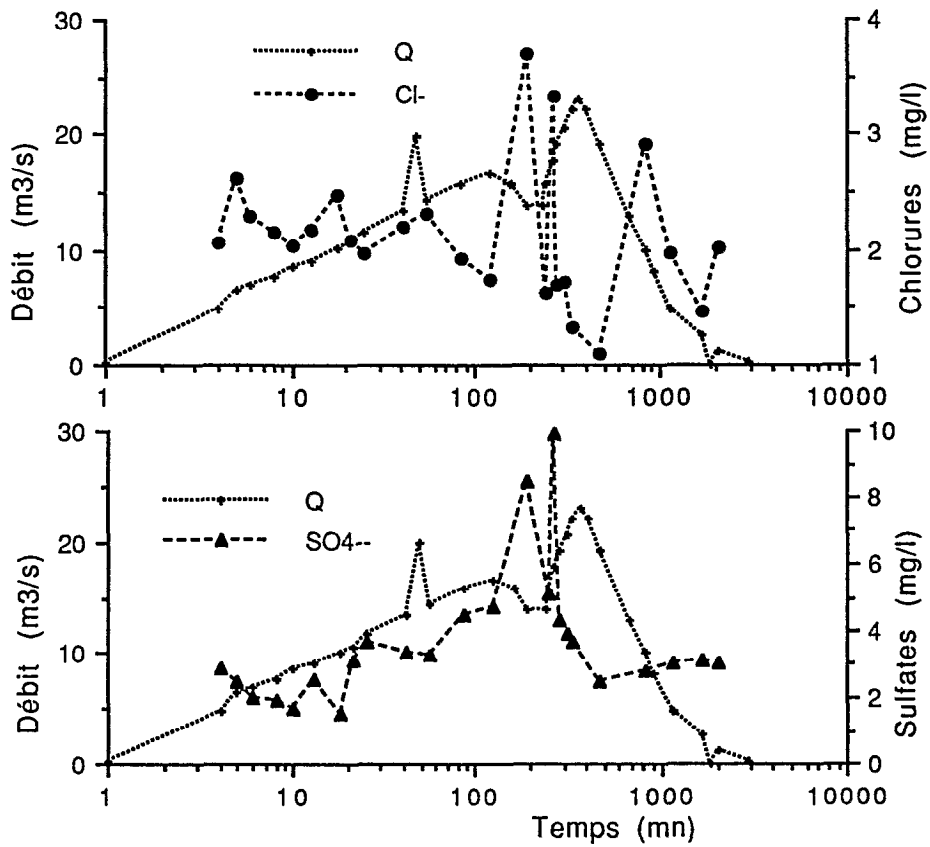


Fig. 4-A.29 Evolution des ions SO₄²⁻ et Cl⁻ durant la crue du 13-14/8/89

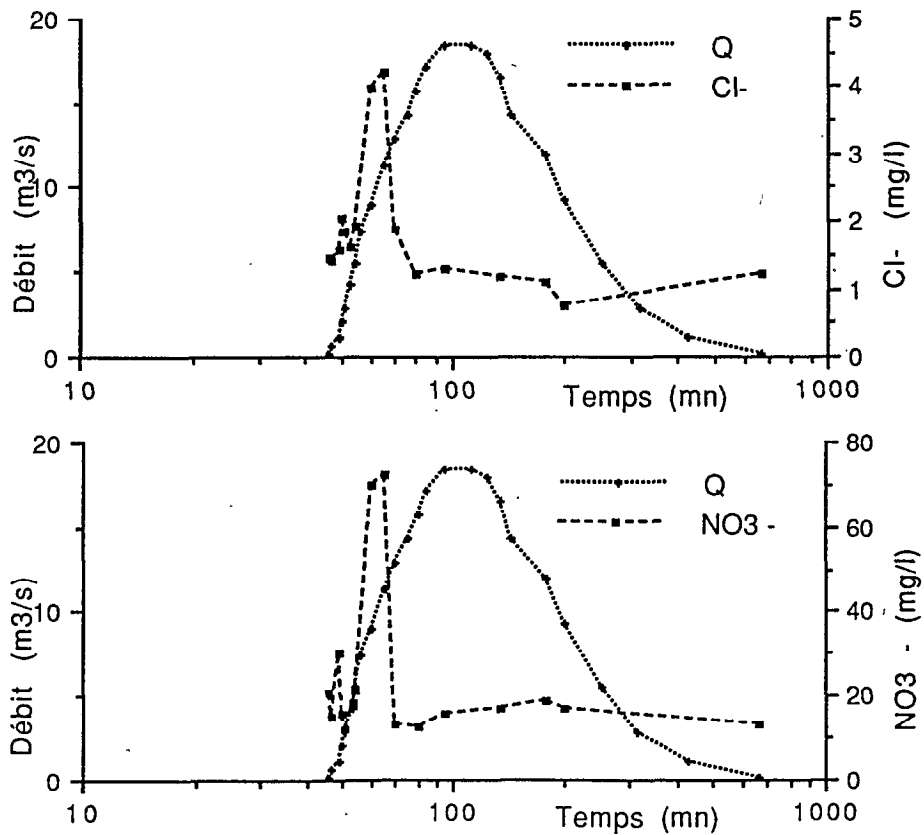


Fig.4-A.30 Evolution des ions NO₃ et Cl⁻ durant la crue du 14-15/8/90

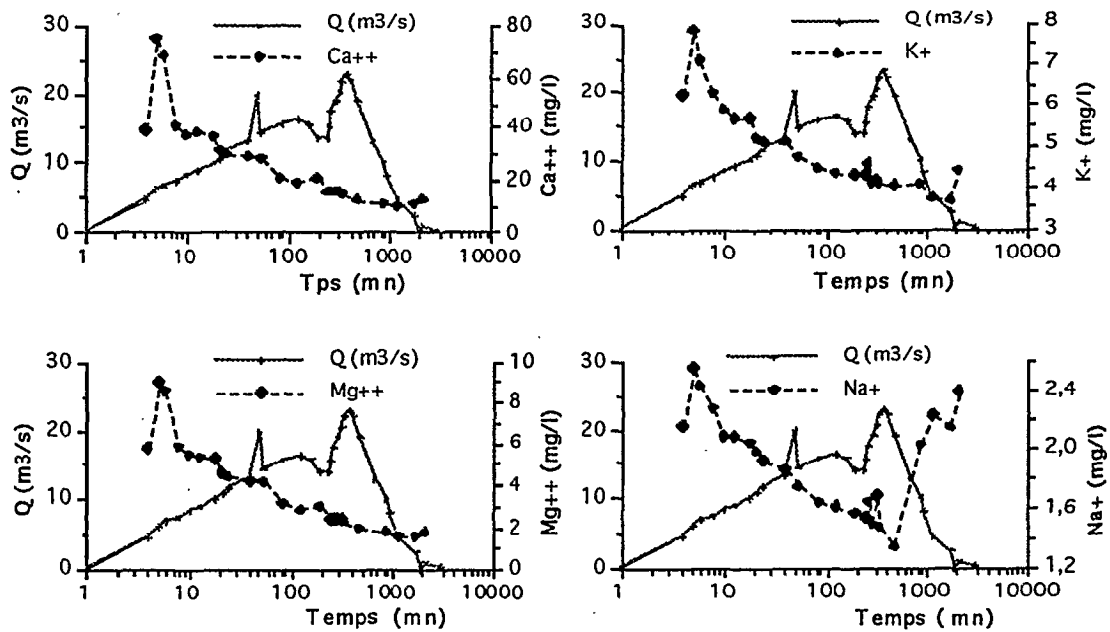


Fig. 4-A.31 Evolution des cations au cours de la crue du 13 au 14 août 1989

La figure 4-A.31 montre que les cations de la crue du 13-14 août 1989 évoluent de façon presque parfaitement similaire; l'échelle du calcium apparaissant logiquement la plus sensible.

– Les faciès physicochimiques:

.Les températures:

Les températures des écoulements de l'Air sont fonction de leur importance et de l'inertie que la masse d'eau pourra donc opposer aux échanges avec l'atmosphère, et avec les réserves alluviales. Des écoulements et des réserves faibles afficheront rapidement des températures en équilibre avec l'atmosphère. Des écoulements importants présenteront un effet tampon plus important aussi bien aux variations nycthélerales, qu'aux restitutions de nappe.

Evolution des températures en cours de crue:

Les premiers écoulements qui concernent généralement des masses faibles de ruissellements locaux sont en équilibre avec l'atmosphère.

Une baisse de température signalera ou du ruissellement pur, ou une expulsion d'eau de nappes superficielles. La différenciation pourra s'effectuer en fonction de l'évolution de la minéralisation:

Une absence de variation identifiera un rejet d'eau du lit mineur au travers d'alluvions lessivées; la figure 4-A.32 illustre ce cas de figure: La crue du 14-15/8/90 qui survient immédiatement derrière celle du 13-14 trouve les alluvions du lit lessivées; simultanément pH, alcalinité et conductivité évoluent à la baisse.

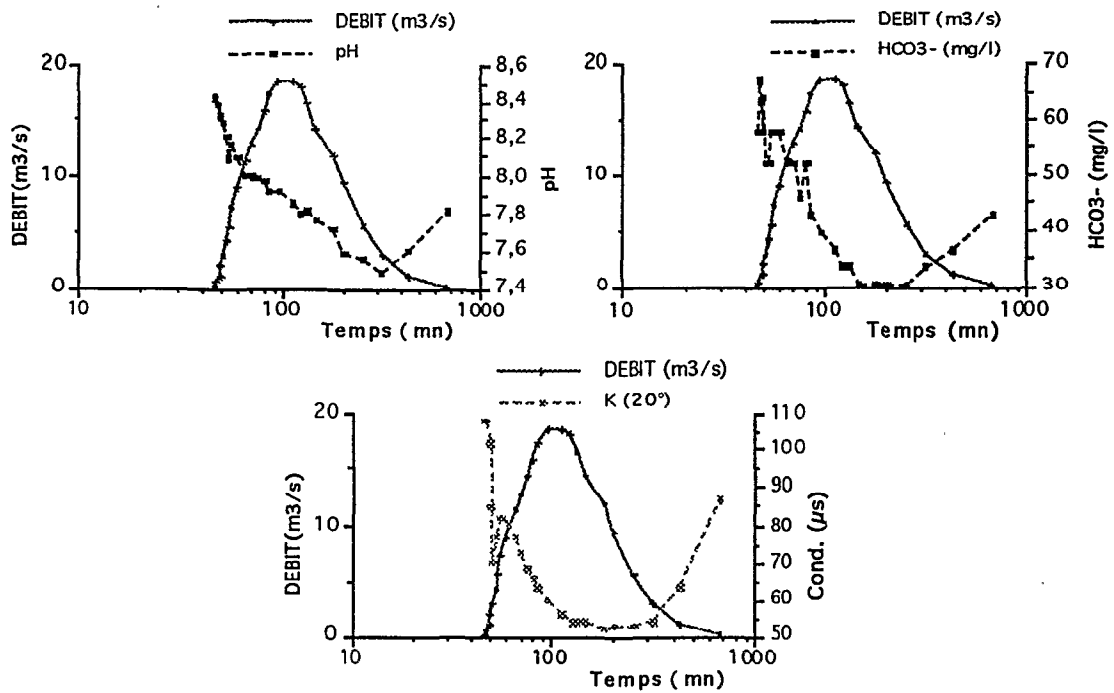


Fig.4-A.32 Paramètres physicochimiques de la crue du 14-15/8/90

Une augmentation concomitante de minéralisation (explicitée par une hausse de l'alcalinité) signalera la venue d'eaux de lessivage des berges et des versants (fig.4-A.33).

Ultérieurement aux rejets de nappes et apports latéraux, les variations de température ne sont plus liées qu'aux échanges atmosphériques en fonction des masses d'eau:

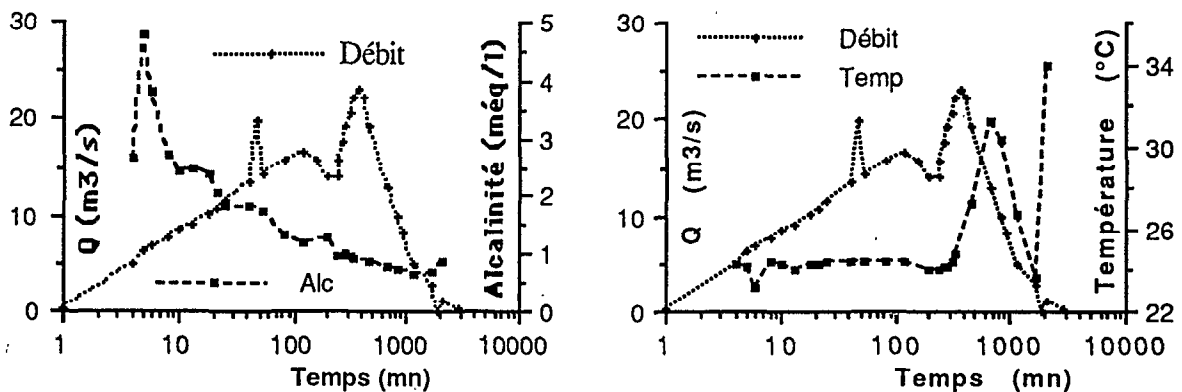


Fig.4-A.33 Alcalinité et température de la crue du 13-14/8/89

Les décrues nocturnes sont marquées par des chutes de température d'autant plus nettes que les débits sont faibles. Le retour du rayonnement diurne sur ces mêmes faibles quantités occasionnera de rapides remontées du thermomètre, comme le montre aussi la figure 4-A.33.

. pH et alcalinité:

Le pH est étroitement lié à l'alcalinité, elle même le reflet de la richesse des eaux en cations (annexe 4-A.I,2).

Evolutions en cours d'écoulement:

Les pH de début d'écoulement, souvent élevés (> 8), signalent des eaux en équilibre avec le système calco-carbonique (eaux saturées en calcite; présence de CO_3^{2-}).

Ces eaux qui ont stagné au contact avec l'atmosphère, issues du lit mineur ou de la zone non saturée peu profonde, participent donc dès les premiers instants aux écoulements (crues des 25-27/7/88, 16-18/8/88, 23-25/8/88, 13-14/8/89, 26-27/8/89, 14-15/8/90, dont les figures sont en annexe, et pour la dernière ci-avant, fig. 4-A.32).

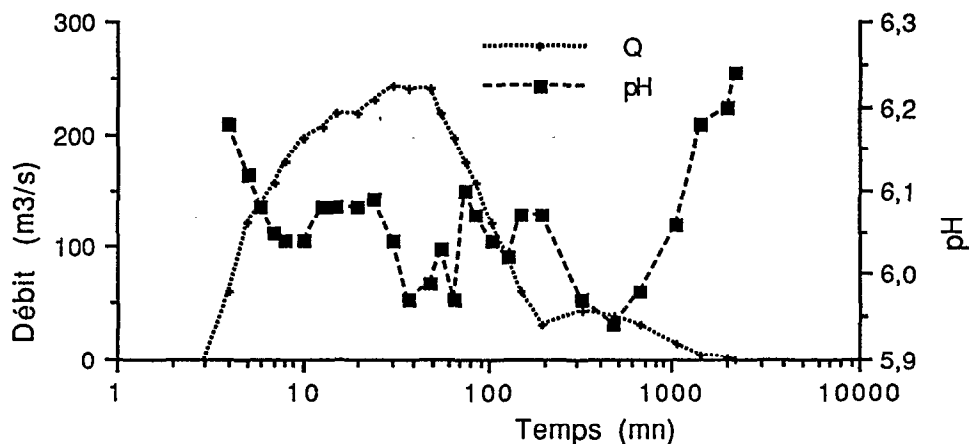


Fig. 4-A.34 pH de la crue du 24-25/7/90

Lorsque le pH est proche de "6", cas de la crue du 24-30 juillet 1990 (fig. 4-A.34), les eaux sont vraisemblablement issues d'un ruissellement pur (pH des pluies compris entre 5 et 6), ou d'un déstockage d'alluvions lessivées contenant peu de minéraux altérés.

Un pH intermédiaire, neutre (fig.4-A.35), signale des eaux déjà issues de mélanges.

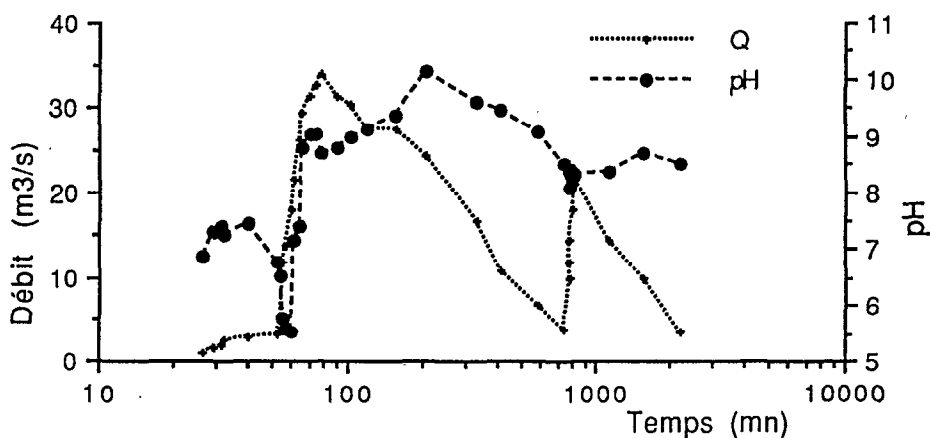


Fig. 4-A.35 Evolution du pH durant la crue du 28-30/7/90

L'augmentation des débits au cours de la montée de la crue se traduira, comme ci-dessus, par une augmentation du pH si les réserves mobilisables de la nappe sont importantes, ou si le contact avec le milieu alluvial altéré a été long; par une diminution correspondant à des phénomènes de dilution si elles le sont moins ou si les temps de contact ont été courts; crues du 13-14 août 1989 et 14-15 août 1990 (fig.4-A.36).

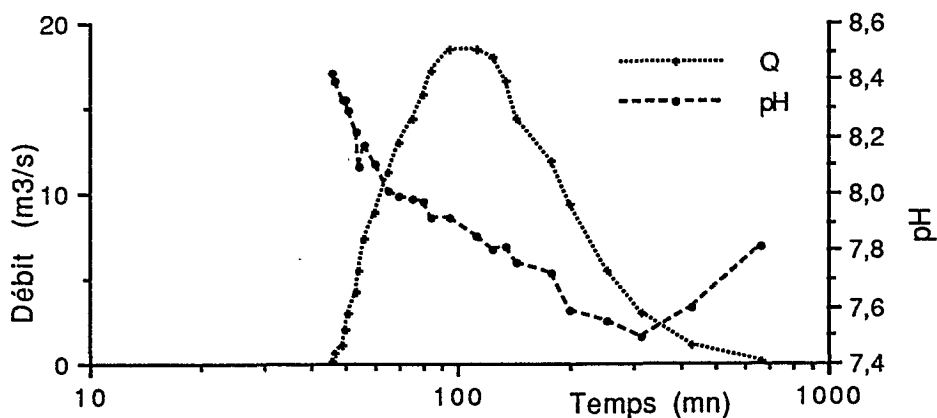


Fig. 4-A.36 Evolution du pH durant la crue du 14-15/8/90

Les fins d'écoulement présentent souvent à nouveau des pH élevés, jusqu'à "9" et plus, qui peuvent être interprétés comme le résultat de séjours, relativement prolongés, des eaux au contact de minéraux hydrolysables de la nappe, lorsque l'alcalinité présente les mêmes caractéristiques de croissance (crues du 14-15/8/90, fig.4-A.32).

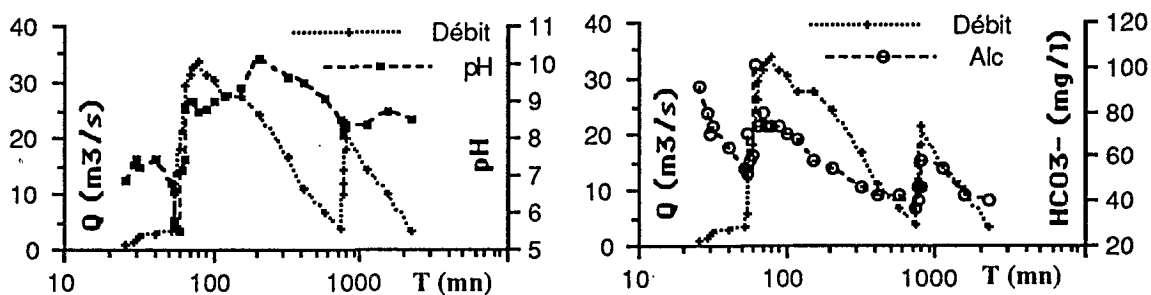


Fig.4-A.37 Evolutions du pH et de l'alcalinité de la crue du 28-30/7/90

Lorsque les pH sont élevés et que l'alcalinité reste faible, le phénomène ne peut être attribué qu'à un dégazage (diminution de la pression de CO_2) des eaux (crues des 26-27/8/89, 28-30/7/90, fig. 4-A.37).

.La conductivité:

Elle est caractéristique des phénomènes de minéralisation-dilution et d'évaporation.

Evolution en cours de crue:

Débuts et fins d'écoulements correspondent généralement aux conductivités les plus élevées:

Les débuts, en raison d'expulsions d'eaux de nappes minéralisées, ou d'arrivée d'eaux de lessivage des berges et des versants;

Les fins, en raison de la concentration ionique résultant de prélèvements évaporatoires sur des eaux d'origine lointaine relativement minéralisées du fait de leur contact prolongé avec les matériaux hydrolysables du bassin. Conductivité et alcalinité évoluent alors dans le même sens (figure 4-A.32). Une augmentation de la conductivité, l'alcalinité restant faible, signalera plutôt une eau évaporée d'alluvions lessivées; cas de la crue du 13-14/8/89 (fig.4-A.38).

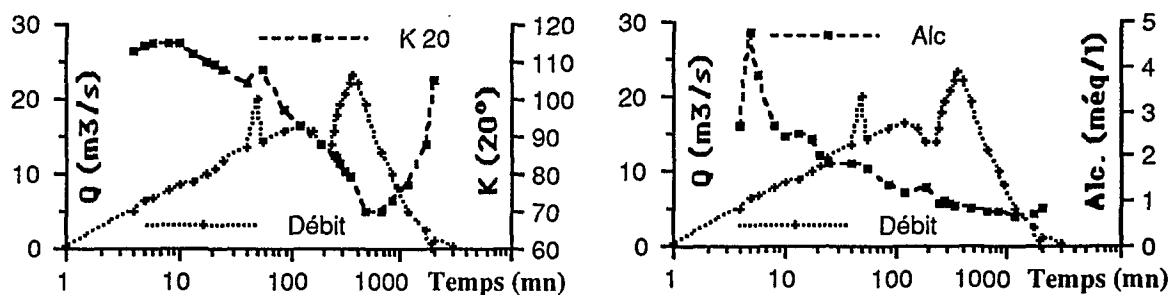


Fig. 4-A.38 Conductivité et alcalinité de la crue du 13-14/8/89

Le passage des débits les plus importants s'accompagne (fig. ci-dessus) de phénomènes de dilution, que soulignent les faibles conductivités. La très importante crue du 16-18/8/88 au débit de pointe de $425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ fait exception (fig.4-A.39):

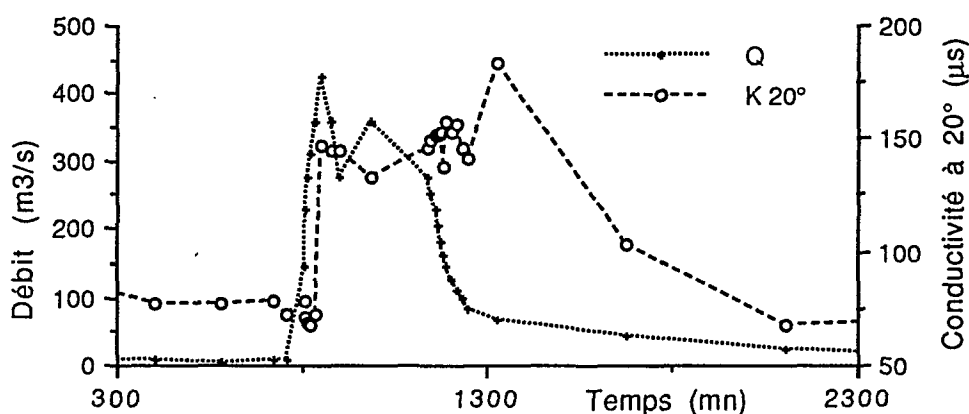


Fig. 4-A.39 Conductivité durant la crue du 16-18/8/88

Les débits de pointe et plus encore de première partie de décrue sont marqués par des conductivités élevées qui peuvent être liées au lessivage d'importantes parties du bassin, et ou, du lit majeur, rarement mis à contribution. L'existence de pics de sulfate, nitrate et chlorure associés à des pics de sodium et de potassium, en absence de calcium et de magnésium, attestent de ces lessivages de surface, plutôt que de phénomènes de restitution de nappe.

– Le faciès isotopique des crues: (annexes 4-A.III,4,5,10,13,14)

Il dépend de la signature des eaux de précipitation, de l'importance des réserves mobilisables de la nappe alluviale avec lesquelles les eaux de ruissellement se mêleront, et de la morphologie des écoulements dont dépendra un plus ou moins grand développement de l'évaporation.

L'évolution de la teneur en oxygène-18 en cours d'écoulement est prise à titre d'exemple, parce que l'étude de cet isotope a été plus complète, pour chaque événement, que celle du deutérium, dont l'évolution est par ailleurs, et naturellement, très proche.

.En début de crue, le faciès isotopique est sous l'influence des premières précipitations et des premiers ruissellements du bassin qui, à des degrés divers, sont marqués par

l'évaporation; en fonction de la sous-saturation de l'atmosphère, et des fortes températures au sol rencontrées par les premières gouttes. Les eaux les plus négatives (les moins marquées par l'évaporation) sont enregistrées pour les crues du plus fort de la saison des pluies (23-25/8/88, fig. 4-A.40; 13-14/8/89, fig. 4-A.42) avec des $\delta^{18}\text{O}$ de - 5 à -7 ‰. Les eaux les plus évaporées ont été observées pour la petite crue du 13-14/8/90 ($0 < \delta^{18}\text{O} < +1$).

La teneur en oxygène 18 de la plupart des eaux de début d'écoulement se situent entre ces deux extrêmes ($-3 < \delta^{18}\text{O} < -1$).

Il semble d'autre part, comme le montre la comparaison des valeurs de deux crues importantes (16-18/8/88 et 23-25/8/88) qu'un "effet de masse" qui pourrait se traduire, comme pour les pluies, par une teneur isotopique appauvrie des masses d'eau les plus importantes, puisse être largement altéré par le temps de transit (fig. 4-A.40).

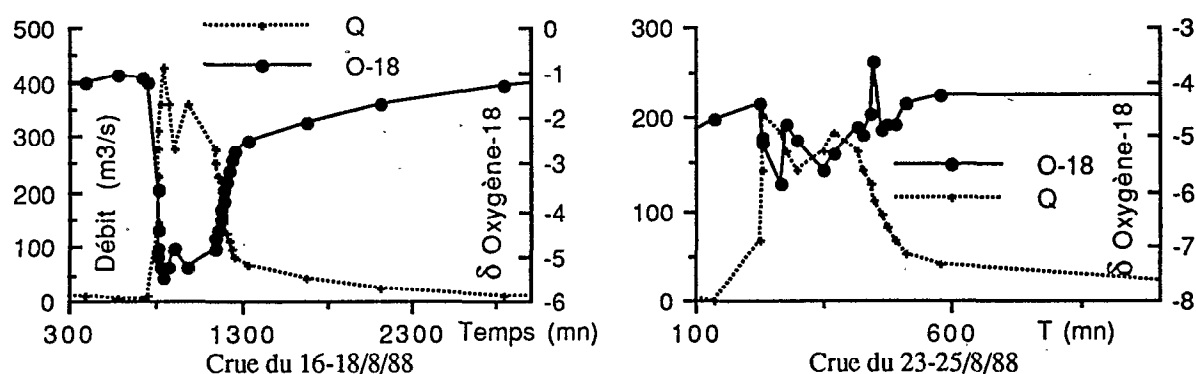


Fig.4-A.40 Faciès isotopiques de deux crues importantes en 1988.

Les teneurs en oxygène-18 du début de la crue du 16-18/8, en provenance du haut Téloua, apparaissent nettement moins négatives que celles de la crue du 23-25/8/88, dont l'origine est le proche bassin intermédiaire.

Au cours de la montée de la crue le faciès isotopique connaît de rapides fluctuations, vers des valeurs plus élevées, lorsque survient une participation de la nappe superficielle où les eaux ont été soumises à évaporation, vers des valeurs plus faibles, lorsque le ruissellement pur est à nouveau prédominant, crues des 13-14/8/89, 26-27/8/89, fig.4-A.41.

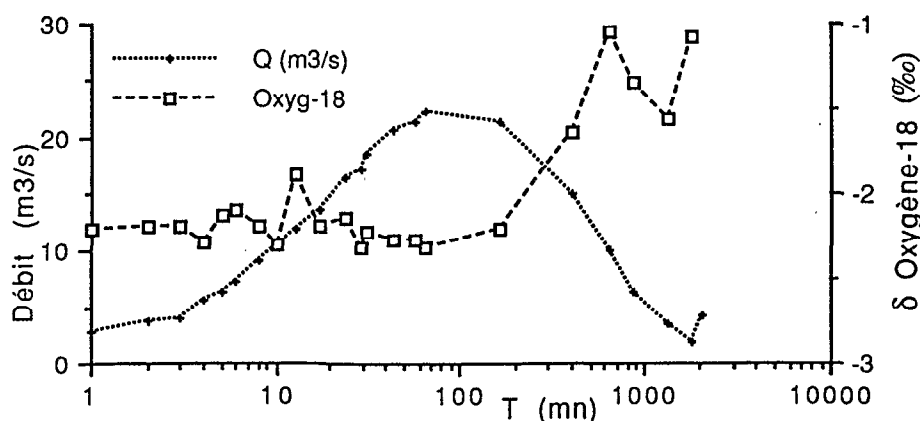


Fig. 4-A.41 Teneurs en oxygène-18 de la crue du 26-27/8/89

– Le passage du corps de la crue qui fait appel à une proportion croissante d'eaux de ruissellement, se traduit le plus souvent par un affaiblissement des valeurs isotopiques; crues des 13-14/8/90, 24-25/7/90 ou 13-14/8/89 (fig.4-A.42).

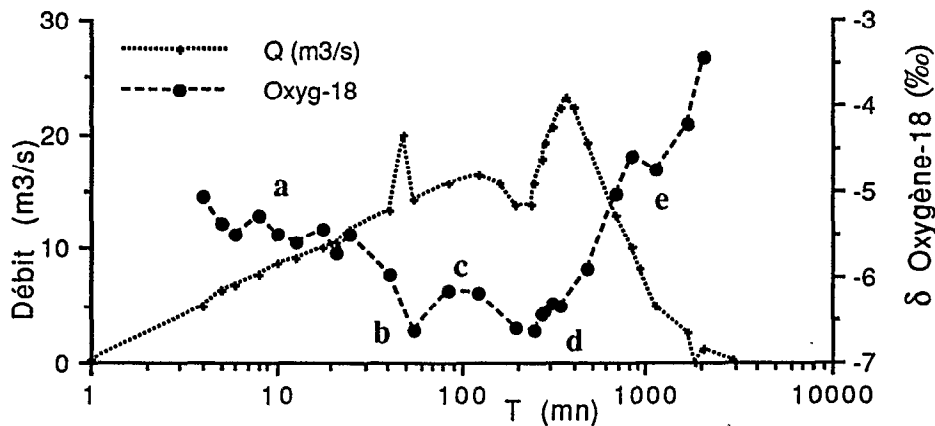


Fig. 4-A.42 Teneurs en oxygène-18 de la crue du 13-14/8/89

Cette figure permet également d'apprécier la qualité du signal isotopique qui marque dans le détail chacune des phases d'écoulement de la crue:

La montée de la crue (a) est marquée par toute une série de fluctuations relatives aux participations majoritaires alternatives du ruissellement pur et des rejets de nappes superficielles.

Le petit pic d'écoulement correspond à un net appauvrissement en oxygène 18 (b) qui signale l'apport d'eau de ruissellement, bref mais significatif, d'une partie du bassin.

La fin de la montée de cette première partie de la crue qui correspond, compte tenu du temps de transit, à des apports du proche bassin intermédiaire du Téloua, voit la proportion des apports de nappe augmenter à nouveau, occasionnant un léger enrichissement (c) des eaux.

La décrue qui s'amorce diminue la pression hydraulique sur la nappe, redonnant aux eaux de ruissellement pur une nouvelle importance (d) qui se traduit par un appauvrissement.

La deuxième partie de la crue correspond à un nouvel accroissement des débits qui résulte de l'arrivée d'eaux plus lointaines, dont le temps de contact avec l'atmosphère plus long a favorisé l'évaporation. Cela se traduit par un enrichissement progressif (e), d'environ 3 δ, de la teneur en oxygène-18, qui se prolonge durant la décrue.

.A la décrue, la plupart des écoulements présentent un faciès évaporé en raison du volume des écoulements en réduction soumis directement à évaporation (d'autant plus que la décrue sera diurne), ou de la vidange de nappes superficielles également évaporées; crues des 25-27/7/88, 13-14/8/89, 26-27/8/89 (fig. 4-A.41), 24-25/7/90.

CONCLUSION:

Les mesures physicochimiques effectuées sur la nappe du Téloua au cours de la saison des pluies 1990 ont donc permis de mettre en évidence l'existence d'échanges entre l'eau et le milieu matriciel sablo-limoneux.

Ces échanges semblent se développer plus particulièrement, entre 0,30 et 1 mètre, à la faveur des fortes températures diurnes et de vitesses de circulation d'autant plus importantes que l'on est proche de la surface: de l'ordre de quelques décimètres par heure, dans les 50 premiers centimètres; à quelques centimètres par heure à partir d'un mètre (Lefèvre, 1960; Roche 1964). Au delà de quelques mètres la vitesse de transit n'est plus que de quelques centimètres par jour (Balmer et Muller 1988; Plata Bedmar et al, 1989). A ce niveau, il est vraisemblable que dans les phénomènes d'échanges eau-roche les vitesses moindres et l'isolement des fortes températures de surface soient partiellement compensés par des temps de résidence plus élevés.

Quoiqu'il en soit, ces vitesses de transit montrent que la zone "0 - 1,5 mètres" est aussi un lieu de transmissivité privilégiée, et qu'elle devrait donc constituer le secteur préférentiel des échanges nappe-écoulement au moment des crues des koris.

Les analyses chimiques et isotopiques, qui ont été réalisées sur des échantillons prélevés de façon concomitante, ont permis de montrer que le faciès bicarbonaté calcique des eaux de la nappe alluviale correspondait à celui des eaux d'écoulement, que si la nappe était peu soumise aux effets de l'évaporation, elle était un lieu de reconcentrations minérales par hydrolyse, en liaison avec des températures et des vitesses d'inféoflux élevées, des pH légèrement acides. Enfin, la permanence de nitrates, dans la nappe alluviale du Téloua, à des concentrations toujours sensibles, constitue un véritable problème pour la ville d'Agadez dont l'alimentation en eau dépend, jusqu'ici, entièrement de ce milieu.

Le même type d'investigations mené sur les eaux de surface a permis d'établir:

.que le faciès chimique des écoulements était très proche de celui des eaux souterraines, bicarbonaté-calcique, occasionnellement marqué par l'évaporation (pôles Cl^- , SO_4^{2-}), et ou, la pollution (NO_3^-).

.que les différents ions, comme les paramètres physicochimiques, se révélaient d'excellents signaux des diverses participations aux écoulements (à part la température, dont la qualité reste limitée dans le temps), pH et alcalinité étant plus particulièrement le reflet de l'importance des phénomènes d'hydrolyse des silicates, la conductivité celui des phénomènes de dilution et d'évaporation.

Le signal isotopique de l'oxygène-18 montre une spéciale aptitude à discerner les diverses participations. Son caractère tranché, d'un milieu à l'autre, et conservatif dans les conditions de l'Air, constitue une intéressante potentialité pour l'étude de la séparation des écoulements.

2) Analyse statistique multidimensionnelle des écoulements:

L'étude du faciès des crues qui précède a montré, qu'un grand nombre de paramètres chimiques, physicochimiques, ou isotopiques, étaient significatifs, pris individuellement, pour expliquer les différents scénari d'écoulement, et que, la plupart du temps, une liaison plus ou moins forte existait entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter

l'importante masse de données, correspondant pour chaque crue à tous ces paramètres, d'une manière globale, en utilisant une méthode d'analyse multidimensionnelle comme l'Analyse en Composante Principale (ACP).

a) Principe:

Chaque échantillon d'eau de crue prélevé, correspondant à un débit ponctuel, constitue une unité statistique. Les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des neuf crues analysées au cours des trois années a donc été traitée statistiquement grâce au logiciel STATITCF.

Dans l'importante quantité d'informations proposées par la sortie informatique des résultats, quatre méritent plus particulièrement attention:

Deux sous forme de tableaux (annexes 4-A.III,24,27,30,33,37);

– Le pourcentage d'explication de la variance de chacun des trois axes principaux fixés définit la qualité de l'ACP. La somme des pourcentages devant tendre vers "100"; mais 75 % de variance expliquée constituent déjà un résultat acceptable.

– La matrice des coefficients de corrélation présente le degré de liaison de chacun des paramètres avec les autres au sein d'un même événement.

Deux sous forme graphique (annexes 4-A.III,25,26,28,29,31,32,34,35,36);

– L'espace des variables est représenté suivant les deux premiers axes qui expliquent, la plupart du temps, les trois quart au moins de la variance:

. L'axe d'inertie principal "1" (horizontal), explique à lui seul 50 % au moins de la variance. Il est défini par les facteurs les plus explicatifs; dans le cas des eaux de crue du Téloua: Q, HCO_3^- , Ca^{2+} .

. L'axe d'inertie secondaire "2" (vertical), explique 15 à 30 % de la variance. Il est défini par les facteurs secondaires résultant de l'évaporation ou de la pollution; dans le cas du Téloua: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- .

Les variables significatives se situent en périphérie de l'espace circulaire défini par les axes, et à leur proximité. Des variables situées dans un même secteur évoluent dans le même sens; des variables situées dans des secteurs diamétralement opposés évoluent en sens inverse.

– L'espace des unités statistiques permet d'observer, pour chaque crue, la répartition des eaux suivant deux axes de minéralisation; le premier horizontal et croissant de gauche à droite, concerne les processus géochimiques, le second vertical et croissant de bas en haut, concerne les processus d'évaporation et de pollution.

b) Résultats:

– La qualité de l'ACP : (Annexes 4-A.III, 24, 27, 30, 33)

. La crue du 13-14 août 1990 présente les meilleures liaisons, puisque 75 % de

la variance est expliquée par le seul axe "1"; près de 24 % par l'axe "2", soit près de 99 % pour les deux premiers axes.

. La crue du 16-18 août 1988 et celle du 28-30 juillet 1990 présentent les liaisons les plus médiocres puisque 67 % et 68 % seulement des variances apparaissent expliquées par les deux premiers axes.

. Le traitement des autres crues est plus satisfaisant puisque 75 à 80 % en moyenne des variances sont expliquées par les axes "1 et 2".

– Les matrices de corrélation (mêmes annexes 4-A.III) permettent d'évaluer le type de minéralisation des écoulements, et par la même les phénomènes responsables de ces écoulements:

. La matrice du 13-14/8/90 (annexe 4-A.III,30) présente évidemment les meilleurs coefficients de corrélation. L'observation de la liaison de la conductivité avec les autres facteurs permet de constater, outre l'excellente et naturelle relation avec l'alcalinité, un lien préférentiel avec le tandem chlorure-sulfate (caractéristique des phénomènes d'évaporation), plutôt qu'avec les cations (significatifs des phénomènes d'hydrolyse).

La qualité (valeur du coefficient de corrélation) des relations entre les bicarbonates (reflet de la minéralisation) et les autres éléments confirme cette analyse:

$$r(\text{HCO}_3 - \text{Cl}) = 0,988$$

$$r(\text{HCO}_3 - \text{SO}_4) = 0,946$$

$$r(\text{HCO}_3 - \text{Cations}) \approx 0,5$$

Ces constatations amènent à la conclusion que les phénomènes qui ont présidé à la minéralisation des eaux de la crue du 13 au 14 août 1990 ont été préférentiellement des phénomènes de lessivage de surfaces évaporées du bassin, ou de restitution de nappes superficielles partiellement évaporées dans lesquelles les phénomènes d'hydrolyse étaient marginaux. Si on considère que la crue du 13-14 suit immédiatement celle du 10-12 août, cette interprétation apparaît d'autant plus plausible.

. La matrice du 16-18 août 1988 est à l'opposé très médiocre (annexe 4-A.III,33) Les débits n'apparaissent bien corrélés avec aucun élément. Seule la bonne liaison bicarbonate - calcium et magnésium souligne la qualité des eaux. L'interférence des phénomènes doit être importante au cours de cette crue.

– L'espace des variables permet de reconnaître les éléments qui sont responsables de la minéralisation:

. L'espace des variables de la crue du 24 au 25 juillet 1990 montre (fig. 4-A.43) que les débits évoluent dans le même sens (en extrémité d'axe "1") que les bicarbonates et les cations, habituellement issus des phénomènes d'hydrolyse (Ca, Mg, K); mais en sens inverse du sodium.

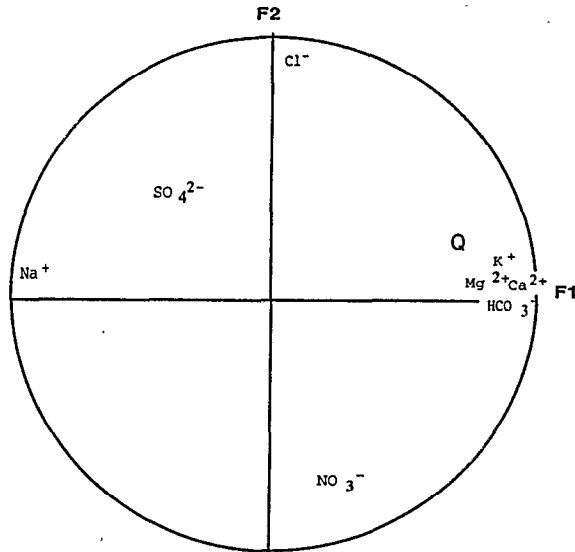


Fig.4-A.43 Espace des variables de la crue du 24-25/7/90

L'espace des variables de cette crue montre également que les chlorures et les nitrates évoluent en sens inverses; ce qui signifie que si les chlorures sont surtout liés à la pluie et au phénomène de lessivage des surfaces évaporées, les nitrates seront liés, avant tout, au phénomène de dissolution des composés organiques, en liaison avec les écoulements les plus étendus et les plus turbulents.

. Dans le cas de la crue du 14 au 15 août 1990 (fig. 4-A.44)

Chlorures et nitrates évoluent dans le même sens; tous les deux correspondent au même phénomène de lessivage des premières eaux de ruissellement sur le bassin et aux reconcentrations par évaporation, sur réserves faibles, en fin d'écoulement.

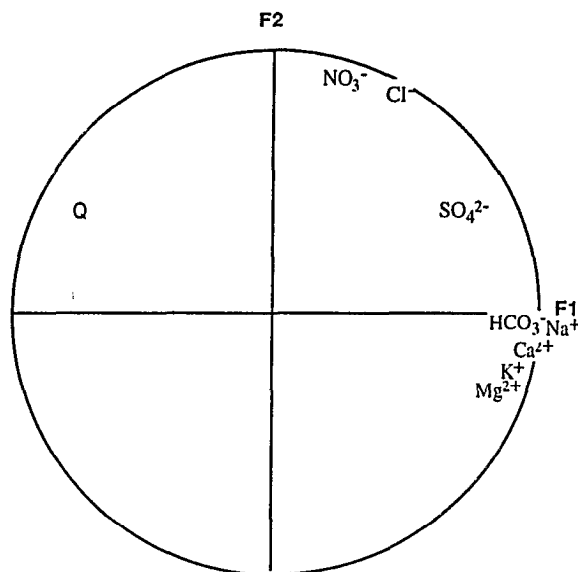


Fig. 4-A.44 Espace des variables de la crue du 14-15/8/90

– L'espace des unités statistiques permet d'établir, à partir des données précédentes, le scénario de minéralisation des écoulements. Des groupes d'unités statistiques, qui relèvent de mêmes types de minéralisation, sont distingués (à l'intérieur de ces groupes les flèches figurent le sens chronologique de l'évolution minérale).

. La crue du 13 au 14 août 1989 est caractéristique de l'évolution généralement constatée (fig.4-A.45)

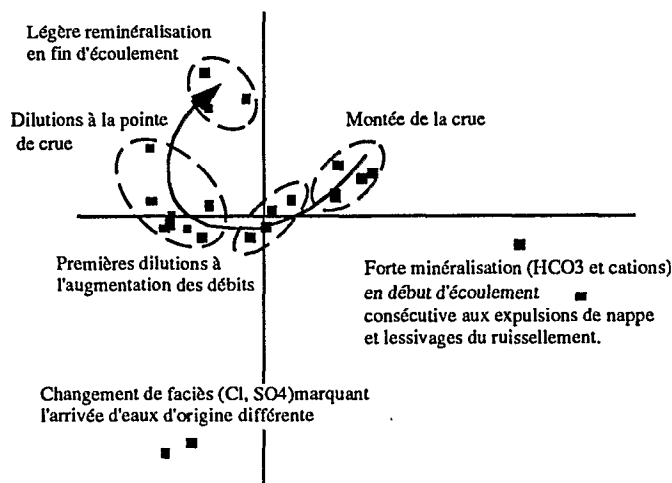


Fig. 4-A.45 Espace des unités statistiques de la crue du 13-14/8/89

Les premiers écoulements se situent en extrémité gauche de l'axe "1"; ils correspondent à des eaux d'expulsions de nappes riches en cations hydrolysables (Ca, Mg).

L'accroissement des débits à la montée de la crue s'accompagne d'un phénomène de dilution qui se poursuit durant une bonne partie de la décrue.

En fin d'écoulement, une reconcentration minérale s'opère sous l'effet de l'évaporation, et de la vidange de nappes alluviales soumises à nouveau au contact des fortes températures diurnes, aux mécanismes d'hydrolyse.

. Les observations effectuées grâce à la crue du 24 au 25 juillet 1990 viennent compléter le schéma habituel d'évolution (fig.4-A.46)

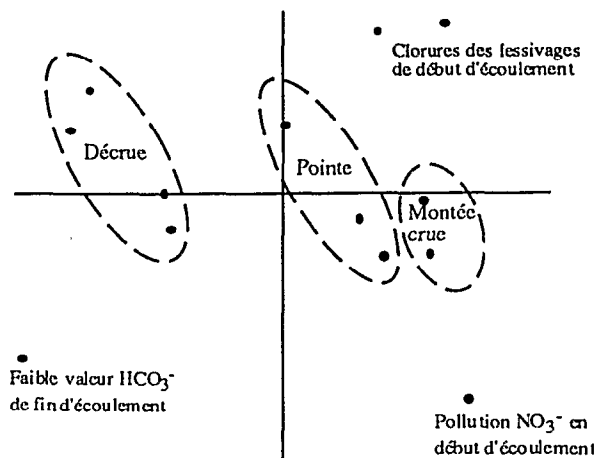


Fig. 4-A.46 Espace des unités statistiques de la crue du 24-25/7/90

En début d'écoulement, certaines crues présentent des pics de minéralisation, liés au lessivage à la surface du bassin de sels issus de l'évaporation d'eaux d'événements précédents; ou de phénomènes de pollution liés à la mise en solution de matière organique par les premières eaux de ruissellement.

. La crue du 16 au 18 août 1988 est atypique dans la mesure où elle ne permet pas de distinguer une évolution de groupes d'unités. Les phénomènes évoluent très vite, et de la même manière, à la crue comme à la décrue, en raison de participations vraisemblablement simultanées de différentes parties du bassin.

. Une ACP globale a été tentée sur les trois crues contrôlées en 1988, afin de vérifier si une évolution se dessinait dans les groupes d'unités en cours d'hivernage. Il semble qu'il n'en soit rien, comme en témoignent la matrice ci-dessous (tab.4-A.3) et la figure 4-A.47.

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,221	1,000							
Cl	-0,122	-0,194	1,000						
NO3	0,096	0,187	0,171	1,000					
SO4	0,207	-0,006	0,358	0,594	1,000				
Ca	0,297	0,919	-0,139	0,260	-0,002	1,000			
Mg	0,413	0,920	-0,166	0,249	0,069	0,959	1,000		
K	0,180	0,492	0,294	0,321	0,108	0,617	0,560	1,000	
Na	0,130	-0,219	0,571	0,059	0,298	-0,182	-0,106	0,219	1,000

% de variance expliquée		
Axe 1	Axe 2	Axe 3
39,4	24,3	12,5

Tab. 4-A.3 Matrice de corrélation d'un ensemble de trois crues en 1988

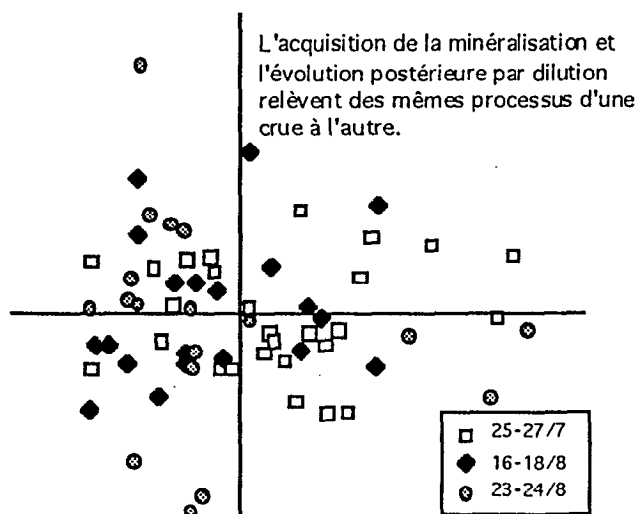


Fig. 4-A.47 Espace des unités statistiques des crues de 1988

CONCLUSION:

Il semble donc que l'acquisition de la minéralisation des premiers écoulements relève toujours, d'une crue à l'autre, des mêmes types de processus; qu'il s'agisse de lessivages de surface ou de rejets de nappes hydrolysées.

L'évolution postérieure, qui est surtout le fait de dilutions (des hautes eaux à la décrue), puis de reminéralisations (en fin d'écoulement), est également semblable.

B. DÉCOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE CRUE

La masse d'informations, physico-chimiques chimiques et isotopiques, recueillies à partir du contrôle simultané des eaux de pluie de nappe et d'écoulement, la qualité des signaux dégagés suivant les principes de marquage définis dans la première partie du chapitre, ont permis d'entreprendre une étude quantitative des diverses participations aux écoulements sur le bassin du kori Téloua (Annexe 2-B.I,5)

I. PRINCIPE DE LA SEPARATION DES ECOULEMENTS:

1) Etudes antérieures:

Après Horton (1933) pour qui l'écoulement n'était, dans une très large mesure, que l'expression de phénomènes de surface, liés au ruissellement et à la morphométrie des bassins; et Barnes (1939) qui pratiqua la première décomposition de l'hydrogramme par méthode graphique; il fallut attendre les années 60, et l'introduction des techniques chimiques et isotopiques dans l'étude du milieu naturel, pour voir de nouvelles recherches s'attacher au problème de la séparation des écoulements, dont certaines à partir de facteurs physico-chimiques, conductivité ou température (Pinder et Jones, 1969; Visocky, 1970; Pilgrim et al., 1979). Au cours des trente dernières années de nombreuses écoles, canadienne (Sklash et Farvolden, 1979), américaine (Hooper et Shoemaker, 1986), néerlandaise (Mook et Groenvelt, 1974), suisse (Caine, 1989) française (Crouzet et al, 1970, Blavoux, 1978) ... ont publié sur la séparation de l'hydrogramme, en utilisant souvent, simultanément, l'outil chimique et isotopique.

La plupart de ces travaux ont été consacrés au milieu tempéré et froid. Seules quelques études ont concerné les milieux semi-aride ou désertique (Levin et al, 1980); bien que l'environnement de ces milieux (sols nus, absence de végétation) et leurs conditions climatiques sévères (saison pluvieuse limitée, caractère orageux des précipitations, forte évaporation) générant des écoulements aussi soudains que fugaces, constituent autant de facteurs favorables à l'utilisation des méthodes géochimiques et isotopiques pour l'étude du cycle hydrologique.

2) Principe du calcul:

Tous les auteurs partent du même principe que si l'eau s'écoulant à un instant donné, à un point d'un bassin, est un mélange d'eaux de différentes origines, ses caractéristiques physiques, chimiques et isotopiques sont fonction des proportions du mélange. La connaissance des différentes composantes de l'écoulement et de leurs caractéristiques permet donc d'accéder aux proportions du mélange, c'est à dire à la séparation des écoulements. Il est

évidemment nécessaire que l'abondance des traceurs puisse s'exprimer en terme de concentrations pour que le principe puisse être appliqué. Si les eaux d'un écoulement de débit "Q" mesuré, possédant une concentration "C" connue, sont issues d'un mélange résultant de la participation de sous bassins (ou, comme dans notre cas, d'eaux "antécédentes" de nappe et nouvelles de pluie), dont les débits Q_a et Q_n auront des valeurs de concentration C_a et C_n , il est possible de formuler les relations suivantes de conservation:

Conservation des débits:

$$Q = Q_a + Q_n \quad (1)$$

Conservation des concentrations:

$$C = C_a + C_n \quad (2)$$

Conservation des flux de concentrations:

$$Q \cdot C = Q_a C_a + Q_n C_n \quad (3)$$

En remplaçant la valeur Q_n par son équivalent $(Q - Q_a)$ on obtient, par simple calcul algébrique, une expression de Q_a seulement fonction du débit mesuré et d'un rapport des concentrations de chacun des milieux (pluie, écoulement, nappe)

$$Q_a = Q \frac{(C - C_n)}{(C_a - C_n)} \quad (4)$$

Lorsque la mise en évidence de la participation d'eaux de nappe a été recherchée, les résultats obtenus par les auteurs sur des bassins de dimensions, de morphométries, et de géologies variées, convergent: les volumes écoulés, portant la marque de stockages, à divers niveaux, sont au moins équivalents à cinquante pour-cent des volumes globaux. L'influence de ces eaux antécédentes est observable durant toute la durée de la crue, des premières manifestations de l'écoulement en passant par le débit de pointe (Kennedy et al, 1986; Caine, 1989; Fritz P., 1975; Fritz P. et al., 1981). La rapidité de réaction des signaux d'expulsion prouvant que les mouvements dans les nappes alluviales relevaient globalement de systèmes "piston flow" plutôt que de mélanges (Annexes 4-A.III).

Jusqu'alors le débit maximum d'une crue était attribué, par les hydrologues, à l'effet quasi exclusif du ruissellement, tout juste reconnaissait-on le rôle, en phase ascendante, d'une restitution de type hypodermique; la participation significative des eaux souterraines n'étant admise qu'en décrue, à l'approche du débit de base; d'autant que les vitesses de circulation mesurées dans les aquifères étaient très faibles (de l'ordre de quelques cm à l'heure).

Il était donc considéré qu'il fallait un certain temps aux eaux infiltrées pour venir alimenter l'écoulement fluvial; et leur participation aussi massive que brutale aux crues était loin

d'être envisagée. Mais comme le rappela Bocquillon en 1987 (cité par Hubert, 1989), répondant aux états d'âme de certains hydrologues : "le transport des molécules, qui se traduit par un débit apparent dans le cours d'eau, ne doit pas être confondu avec la propagation de l'onde, qui est fonction du gradient hydraulique appliqué au milieu".

La rapide restitution des eaux de nappes est donc avant tout liée aux pressions dont elles sont l'objet. La figure 4-B.1 présente schématiquement la coupe transversale type (d'après Morel, 1984; Joseph et Frangi, 1989) des masses alluviales des koris.

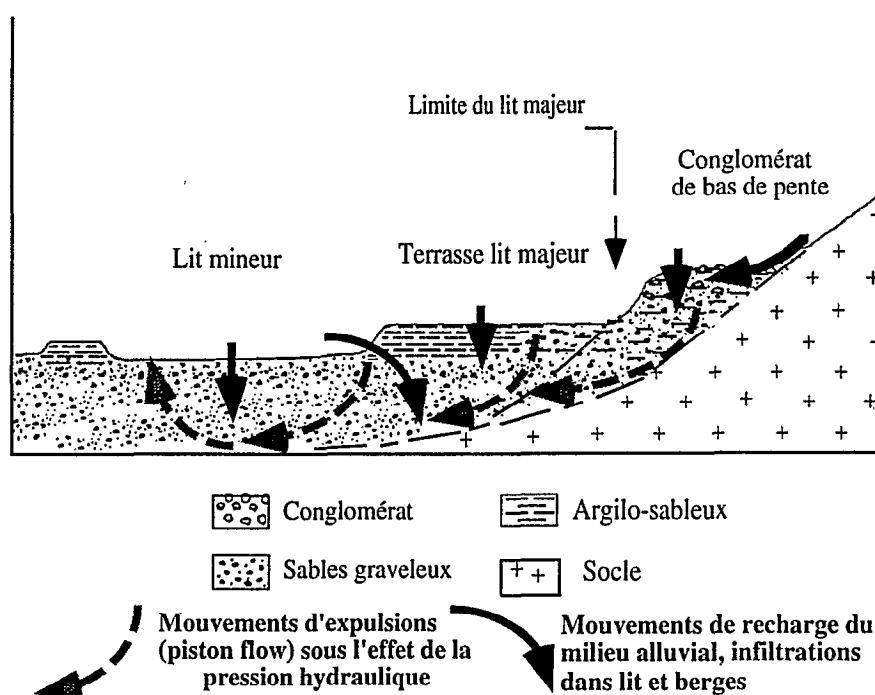


Fig. 4-B.1 Coupe du lit d'un kori, et mouvements dans sa nappe alluviale

Les mouvements d'eaux figurés par les flèches relèvent des multiples observations allant de simples mesures physiques de contrôles piézométriques (Armand, 1986) aux campagnes géophysiques (Armand et Dehays, 1987) ou géochimiques (Plata Bedmar et al, 1989) réalisées dans l'Aïr, et sur le Kori Téloua en particulier.

La mise en œuvre du principe suppose un certain nombre de conditions:

- .Les mêmes signaux doivent évidemment exister dans les différents milieux,
- .Ils doivent s'exprimer en termes de concentrations suffisamment distincts tout au long de la séquence d'observation,
- .Ils devront être le plus conservatif possible; c'est à dire ne pas échanger, où le moins possible, avec l'environnement.
- .Enfin ils devront présenter une solubilité suffisante qui permette à leur phase aqueuse d'évoluer rapidement.

La précision du calcul dépendra, outre l'incertitude attachée aux concentrations, des écarts existant entre elles (Crouzet et al, 1970). La qualité de la décomposition pratiquée sera d'autant plus fiable que les teneurs des milieux (atmosphériques, terrestres et souterrains) seront divergentes.

II. CONDITIONS DE L'APPLICATION AUX EAUX DU TÉLOUA:

1) Les conditions hydrodynamiques:

L'environnement sub-désertique de l'Aïr apparaît particulièrement apte à générer ces écarts, garants d'une bonne mise en œuvre du principe. L'annexe 4-B.II,6 qui présente les références des eaux de pluies et de nappes retenues pour le calcul montre, par exemple, que pour la crue du 13 au 14 août une différence de plus de quatre delta existe, pour l'oxygène 18, entre les eaux évaporées de la pluie (celle de la région de Dabaga) et les eaux de la nappe.

La réalisation à Azel de prélèvements à trois niveaux du lit alluvial fit apparaître (Fig.4-A.16) l'existence d'un milieu non homogène. Les trois signaux distincts de la nappe constituant autant de flux potentiels que les deux équations de conservation qui précèdent n'étaient pas en mesure de déterminer. Il apparut donc nécessaire d'envisager (Hubert, 1989) un modèle, sur le même principe, capable de gérer non plus deux mais "n" origines aux écoulements, pour lesquelles il fallut considérer "n - 1" traceurs, permettant d'écrire autant d'équations de conservation qui, avec celle de l'eau (1), conduisent aux "n" flux souhaités (4).

a) Cadre d'intervention des divers secteurs de la nappe:

A partir des caractéristiques hydrauliques de la section (profil en travers, relations hauteurs-débits, hauteur-section mouillée, débit-rayon hydraulique \approx profondeur moyenne sur les profils subhorizontaux en travers des koris de l'Aïr), un calcul simple a permis d'estimer les seuils hydrologiques d'intervention des trois secteurs mesurés de la nappe:

– Le lit mineur présente une profondeur moyenne de 0,30 m. A cette cote, la vitesse moyenne étant de $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ et la section mouillée d'environ 15 m^2 , le débit limite (sauf affouillement, peu vraisemblable sur une section régulière de 60 m de large) d'invasion du lit majeur est de $12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Jusqu'à ce débit seule la nappe du lit mineur est donc en principe sollicitée par l'effet "piston flow".

– Le lit majeur est peu développé à Azel, à proximité du seuil hydraulique. La profondeur moyenne correspondant à l'invasion totale du lit n'est que de 0,40 m, soit une section mouillée de $\approx 22 \text{ m}^2$ qui pour une vitesse moyenne de $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ donne un débit seuil d'environ $20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. C'est à partir de ce débit que la nappe de berge est sensée produire. Mais l'effet d'expulsion, directement lié à la charge hydraulique, n'intervient qu'en fonction d'une partie du débit excédentaire qui s'applique à cette section de profil rectangulaire. Cet excédent de débit efficace sera celui du rapport de développement du lit majeur sur la largeur totale du lit. A Azel ce rapport est d'environ 30 %, mais en amont, dans la section du bassin intermédiaire, il est en moyenne de 50 %, et c'est cette valeur qui sera appliquée dans le calcul des débits marqués par la nappe du lit majeur

– La berge est très pentue à proximité de la station d'Azal et il est vraisemblable qu'une cote bien supérieure à 0,40 soit nécessaire pour produire un effet d'expulsion sur la

partie de la nappe correspondante. Il a donc été estimé qu'en dessous d'une hauteur moyenne de 0,80 m, représentant la moitié de la hauteur de la berge, et un débit de $\approx 65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (section mouillée de 43 m^2 et vitesse moyenne de $1,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) la nappe de berge était peu sollicitée.

Dans les calculs qui seront menés ultérieurement, c'est cette valeur seuil qui aurait effectivement été retenue, si les écoulements étudiés l'avaient atteinte.

b) Rappels sur les circulations gravitaires et échanges potentiels:

– Les eaux d'inféro-flux du lit mineur, contrôlées par le piézomètre "0", circulent sous faible épaisseur (jusqu'à quelques décimètres) dans un milieu (sablo-graveleux) à porosité totale de l'ordre de 30 % (Roussin-Bariac, 1985), sous un gradient piézométrique moyen de 3 ‰, équivalent à la pente de l'oued (Joseph et Frangi, 1989). Dans ce milieu plutôt favorable à la circulation, les vitesses subhorizontales restent cependant faibles, de l'ordre de quelques centimètres à l'heure, et les échanges avec l'atmosphère potentiellement importants (Barnes et Allison, 1982, 1983, 1984, 1988). Roche qui effectue en 1964 une série de mesures d'inféro-flux sur la nappe alluviale du bassin intermédiaire du Téloua dans la région de Razel Mamoulni (pente: 3,2‰) note que la vitesse moyenne de $14 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ cache en fait une variation importante entre la surface du lit mineur, où les vitesses ne sont que de quelques centimètres par heure, et la zone 20 - 60 cm où elles dépassent $20 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$. A un mètre de profondeur les vitesses retrouvent les faibles valeurs de surface. Armand en 1985, établit que les mouvements horizontaux dans la nappe alluviale superficielle ne représentent en moyenne que de 5 à 10 % des mouvements verticaux gravitaires. Les échanges se manifestent dans ce secteur:

.physiquement, par élévation du signal thermique et de la conductivité électrique, résultant de la concentration par évaporation des sels dissous et de leur lessivage ultérieur;

.chimiquement, par stimulation des phénomènes d'hydrolyse augmentant la charge ionique signalée par une conductivité électrique, un pH, et une alcalinité en hausse;

.isotopiquement, par enrichissement des fractions lourdes de la molécule d'eau (Aranyossy, 1991) soumise à une forte évaporation (ETP ≈ 4 mètres par an, évaporations bac et piche dépassant encore 10 mm par jour en août, Hoepffner et al, 1980).

– La circulation dans le lit majeur (contrôlé par le piézo "1") constitué en surface de matériaux plus fins sablo-limoneux semblait devoir être plus limité. Mais le rapide tarissement du piézomètre "1" (tableau 4-B.1), malgré un écoulement résiduel dans le lit mineur jusqu'au 7, montre que la circulation dans cette partie de la nappe est aussi très aisée:

Date	Heure	Haut Piézo
5 août 1990	10 h 30	- 31 cm
7 août 1990	9 h 30	- 49 cm
8 août 1990	10 h 30	- 156 cm

Tab. 4-B.1 Tarissement de la nappe du lit majeur à Azel

Les tests de porosité effectués au moment de l'installation du piézomètre "1" explique la facilité de circulation dans ce secteur du lit alluvial (Fig.4-B.2). Il semble donc que cette première terrasse du lit majeur soit granulométriquement très proche de celle du lit mineur (Giazzi, 1990) et que les circulations y soient assez semblables.

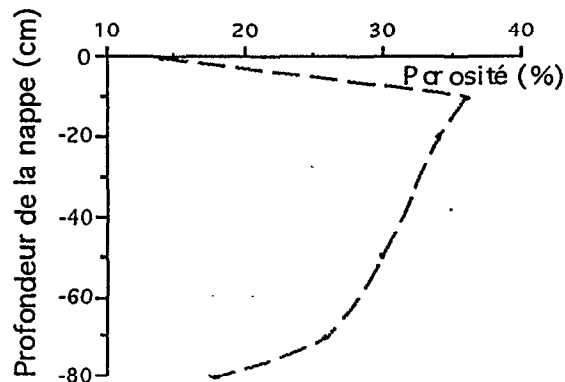


Fig. 4-B.2 Profil de porosité du lit majeur

– La berge, qui constitue parfois une deuxième et courte terrasse (d'un mètre environ) au contact des formations du socle, n'est pas toujours observable dans les vallées de l'Air. A Azel elle représente une accumulation très hétérogène de matériaux d'altération du versant (petits blocs de granite mêlés à des arènes), et de matériaux fins (sablo-limono-argileux) apportés par le ruissellement latéral, et ou, d'un épandage de très hautes eaux du kori.

Les matériaux constituant cette "haute terrasse" se prêtent à priori moins bien à la circulation interne des eaux; d'autant que les matériaux fins limoneux, visibles en surface, ont été retrouvés tout au long du profil de forage du piézomètre. Le battement de la nappe, dans ce secteur au cours de la saison des pluies, n'est que d'environ 0,60 m, alors qu'il atteint 1,50 m dans celui du lit majeur. Les masses alluvionnaires sont d'autre part beaucoup plus limitées et les échanges, tant avec l'atmosphère du fait de la profondeur, qu'avec le lit majeur du fait de la transmissivité, à la fois plus lents et plus faibles. Les températures en rapide équilibre avec le milieu seront peu variables et représentatives de la moyenne annuelle locale. Les autres paramètres chimiques et isotopiques présenteront des faciès également tamponnés, intermédiaires entre ceux des eaux très exposées aux échanges du lit mineur, et ceux des eaux déjà protégées du lit majeur.

D'une manière générale, toute la zone non saturée alluviale, dont l'importance en saison des pluies est fonction du temps séparant deux crues, connaît, en raison de l'intensité de l'évaporation dans sa partie supérieure, mais aussi par simple décharge lors du tarissement, des dépôts de sels que les eaux d'écoulement qui suivent, entraineront. Ce lessivage interne va donner lieu à une sensible reconcentration des eaux pluviales, et constituer un signal de restitution de la ZNS à partir du résidu sec.

2) Le choix des signaux:

Les parties I,II,III, du grand "A" précédent, ont déjà montré que la plupart des paramètres mesurés (physico-chimiques, chimiques et isotopiques) étaient en mesure de différencier dans les écoulements la venue d'eaux d'origines différentes. La réponse *quasi* instantanée des signaux à un changement d'alimentation prouvant que les mouvements dans la nappe alluviale relèvaient bien, le plus souvent, de systèmes "piston", déjà signalés par des travaux antérieurs sur le milieu (Roussin-bariac, 1985; Joseph et Frangi, 1989).

a) Les signaux physico-chimiques:

– Le pH est un bon indicateur des conditions chimiques du milieu. La différence marquée entre la valeur des eaux de pluies ($5 < \text{pH} < 6$) et celle des eaux relevant d'hydrolyse dans la nappe, ou d'équilibration avec le système calco-carbonique à proximité de la surface, ($\text{pH} \geq 8$) garantit la qualité du signal (fig.4-A.37). Mais ne pouvant être exprimé en qualité de concentration il ne peut servir au calcul proprement dit.

– La température est, comme le pH, un bon indicateur de variation des apports. Les eaux qui séjournent dans la nappe tendent à s'équilibrer thermiquement avec l'encaissant dont la facture est proche de la moyenne annuelle des températures atmosphériques locales. Elles apparaissent donc de dix à quinze degrés plus élevées que les eaux de précipitation, marquées par l'évaporation, qui stimulent les écoulements en fin de journée (annexe 4-A.II,7). La qualité du signal est cependant altérée par l'empreinte de la forte variation nycthémérale qui s'impose aux eaux de surface et des premiers centimètres de la nappe (Barnes et Allison, 1984).

– La conductivité traduit le contraste très net entre la minéralisation des eaux de pluie, faible, et celle des eaux de nappe, beaucoup plus élevée, en raison des lessivages de sels dans la ZNS et des échanges avec la matrice. La conductivité apparaît donc également comme un séparateur qualitatif des deux principaux types d'eau (fig. 4-B.3), car les échanges avec le milieu, au cours de l'évènement suivi, constituent un manquement à la règle de conservation.

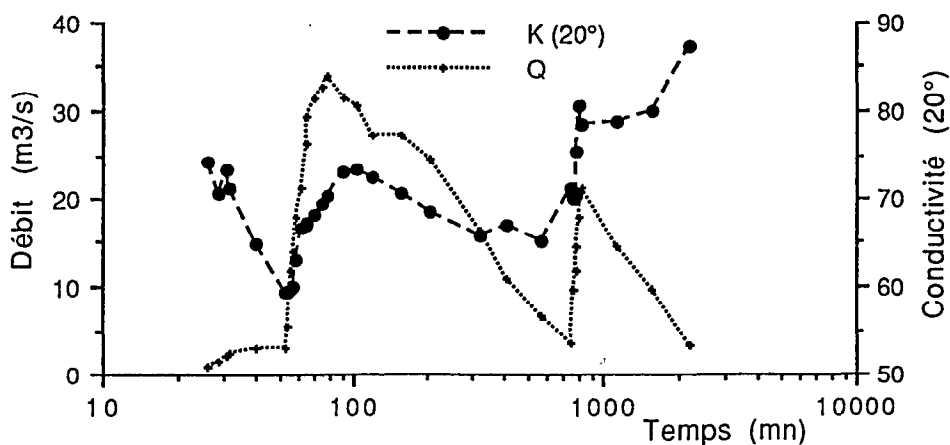


Fig. 4-B.3 Conductivités de la crue du 28-30/7/90

Les paramètres physico-chimiques constituent donc d'excellents signaux qualitatifs, mais momentanés, d'origine des écoulements.

b) Les éléments chimiques majeurs:

Leur existence s'exprimant en terme de concentration, ils apparaissent comme des outils potentiels de la technique de décomposition de l'hydrogramme; à condition qu'ils satisfassent aux exigences de conservatisme et de solubilité (Pilgrim et al, 1979)

Ces éléments doivent exister à la fois dans les pluies et dans la nappe, à des concentrations suffisamment différentes et détectables:

Ainsi si les cations constituent de bons signaux d'arrivée d'eaux stockées (fig.4-A.31), ils sont pratiquement toujours absents des eaux de pluie, et leurs possibilités d'échanges avec la matrice par hydrolyse constituent des facteurs rédhitoires pour une utilisation quantitative dans la décomposition de l'hydrogramme.

Parmi les anions, chlore et brome (nitrates et phosphates n'apparaissent qu'à l'occasion, et présentent des potentialités d'échange avec le milieu non négligeables) semblent pouvoir répondre à l'ensemble des conditions exigées. Mais la détection du brome qui nécessite une sensibilité de l'ordre du "ppb" (le rapport chlore-brome des écoulement > 300; Bourdeau, 1992) est encore assez souvent une contrainte analytique; et seul le chlore, pour lequel un niveau de détection de l'ordre du "ppm" est suffisant, a pu constituer un outil aisément utilisable.

c) Les isotopes stables de l'eau, Oxygène-18 et Deutérium:

Marqueurs intimes de la molécule d'eau, ils sont globalement conservatifs des échanges réalisés avec l'atmosphère avant infiltration. Ils apparaissent donc aptes à souligner l'origine des eaux. Par le jeu de leurs rapports, ils participent, au même titre que les éléments chimiques, aux équilibres de concentrations qui régissent la décomposition de l'hydrogramme (Turner et al, 1987). La distinction des phases suppose l'existence d'un écart significatif de teneur entre les eaux pluviales, responsables du ruissellement, et les eaux de la nappe (fig.4-B.4).

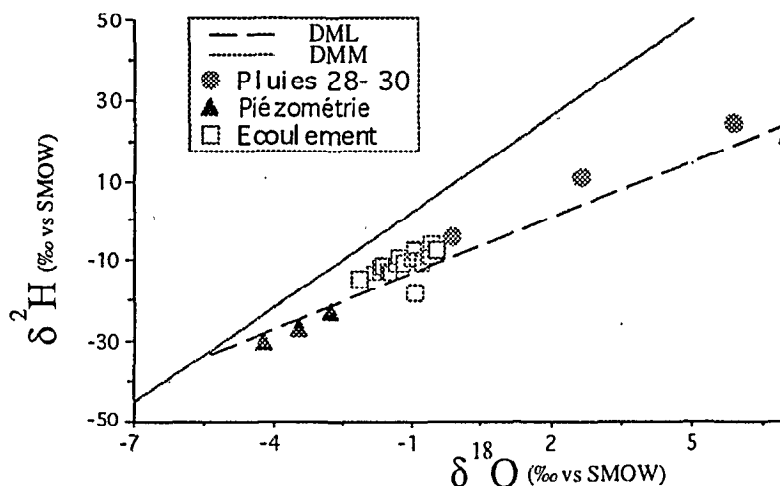


Fig. 4-B.4 Isotopes de l'événement du 28 au 30/7/1990

Par rapport aux traceurs chimiques les traceurs isotopiques (oxygène-18 et deutérium) présentent cet avantage de conserver leurs propriétés en absence d'évaporation, ce qui est souvent le cas pour les eaux alluviales de l'Air. La figure qui précède montre que les trois types d'eaux situées à proximité de la droite locale d'évaporation, ont la même origine atmosphérique et que 3"δ" au minimum séparent les pluies les plus appauvries du bassin des pluies les plus enrichies de la nappe alluviale; les eaux d'écoulement présentant un faciès intermédiaire de mélange. La couverture analytique par l'oxygène 18 étant la plus complète, c'est ce traceur qui a été retenu pour les calculs.

3) Le choix des références d'entrée pour le calcul: (annexe 4-B.II,6)

a) La pluie:

Le choix des concentrations ou des teneurs de référence est assez simple dans le cas des pluies du Téloua. L'étendue du bassin et le caractère orageux (donc souvent circonscrit dans l'espace) des précipitations ne laissant généralement aucun doute sur l'origine de l'écoulement. Lorsque toutefois plusieurs pluies paraissent avoir pu apporter une contribution significative, dans des secteurs voisins du bassin, le choix d'une teneur moyenne, pondérée des quantités respectives, a semblé la solution la moins sujette à caution (Gallaire et al, 1994), en absence d'observations ou enregistrements.

b) La nappe:

Il est effectué, nous l'avons vu, sur des valeurs mesurées, la plupart du temps, juste avant l'arrivée de l'écoulement dont l'importance détermine la prise en compte successive des différents secteurs de la nappe:

.Jusqu'à $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, seule la nappe du lit mineur est concernée,

.Jusqu'à $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ la nappe du lit majeur est sollicitée, pour une fraction des débits, en fonction de la pression hydraulique qu'ils sont en mesure d'exercer.

c) Les débits d'écoulement:

Aucun choix n'est à effectuer pour les écoulements qui résultent des apports simultanés des différents milieux. Trente à quarante valeurs de débits servent, pour chaque crue, de base aux calculs d'évaluation des participations respectives aux écoulements (annexes 4-B.II,1,2,4).

III. DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE QUELQUES CRUES EN 1990:

Les contraintes de terrain et le fait que le contrôle de la nappe n'ait été assuré régulièrement qu'en 1990, ont considérablement limité le nombre d'évènements exploitables pour la décomposition de l'hydrogramme. Finalement 3 crues seulement ont pu être retenues.

1) La crue du 28 au 30 juillet 1990:

a) cadre d'évolution et description de la crue:

La crue du 28 juillet survient 72 heures après la fin de la crue du 24-25 dont le volume écoulé à Azel a été de trois millions de m³. L'heure d'arrivée des eaux peu après 21 heures, alors que la pluie à Azel a eu lieu, comme d'habitude entre 17 et 18 heures, permet de situer l'origine de l'évènement sur la partie intermédiaire du bassin. Le bassin d'Acharak (2,3 km²) dans la région de Razel, à mi chemin entre Azel et Dabaga, en rive droite du Téloua, est le cadre d'une averse assez homogène de 15 mm ce jour là. Il est vraisemblable, compte tenu de l'étroitesse de la vallée à cet endroit, qu'à son instar, la plupart des petits bassins affluents de la région aient apporté leur contribution aux écoulements du Téloua. Après des écoulements assez faibles de 2 à 3 m³.s⁻¹ durant une demi heure, le corps d'une première crue survient brutalement et le débit de pointe de 34 m³.s⁻¹ est atteint au bout de 24 minutes. Suit une décrue d'une dizaine d'heures au cours de laquelle les écoulements retombent à dessous de 5 m³.s⁻¹. La remontée brutale des débits, jusqu'à 21 m³.s⁻¹, s'opère le lendemain matin à 9 heures, dans une atmosphère calme et limpide. Les eaux de cette seconde pointe de crue sont issues du haut Téloua, le temps de transit d'une douzaine d'heures l'atteste, de même que le long tarissement qui suit durant près de 48 heures.

b) Origine et signaux:

En dehors de la pluie, caractéristique du ruissellement, trois origines de nappes sont disponibles pour cet évènement, et trois signaux ont été exploités en vue de comparer leur efficacité (oxygène 18, chlorure et nitrate). Les valeurs de référence de ces signaux sont présentées ci-dessous (Tableau 4-B.2), extraites de l'annexe 4-B.II,6.

Références	Pluie (mm)	Oxygène-18 (δ ‰)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg.l ⁻¹)
Pluie AZEL	10,4	-0,19	0,43	32,50
Pluie AOUDERAS	2,4	2,63	2,31	39,70
Piézo 0		-2,77	2,10	12,99
Piézo 1		-4,26	2,78	26,20
Piézo 2		-3,48	2,06	9,23

Tab. 4-B.2 Valeurs des signaux Pluie-nappe de la crue du 28 au 30/7/90

c) Le calcul:

Il intervient suivant le principe défini au § B.I,2. Le détail du calcul est présenté par l'annexe 4-B.II,1. Comme les écoulements n'atteignent pas le deuxième seuil de 65 m³.s⁻¹ qui a été arbitrairement fixé, la valeur du piézomètre "2" n'entre pas dans le calcul. Jusqu'à 12

$m^3.s^{-1}$ seul le signal du piézomètre "0" est utilisé. Au dessus de $12 m^3.s^{-1}$, l'excédent de débit est partagé par moitié en fonction de l'appréciation du développement du lit majeur par rapport à la section. Les valeurs du piézomètre "0" comme du piézomètre "1" ne sont donc appliquées qu'à un demi excédent.

Le calcul a été mené complètement pour l'oxygène 18 et le chlore, les résultats restant du domaine de la vraisemblance (le rapport des débits de restitution et des débits globaux d'écoulement étant la plupart du temps inférieur à "1"); partiellement en utilisant le signal nitrate, car la détermination des débits rattachés au piézomètre "0" produisait déjà un résultat incohérent (le débit de la nappe du lit mineur représentant plus que le débit du cours d'eau).

d) Commentaire et interprétation:

La figure 4-B.5 présente la décomposition de l'hydrogramme utilisant l'oxygène-18 comme traceur. La participation de la nappe est assez modeste dans les écoulements du premier corps de crue, de l'ordre de 35 à 40 %. La participation du lit majeur apparait limitée, de l'ordre de 20 % des apports de la nappe, compte tenu des débits très moyens de cette crue.

Les débits de restitution apparaissent par contre beaucoup plus importants relativement aux écoulements du deuxième corps de crue (de l'ordre de 60 à 70 %). Compte tenu de la faiblesse des écoulements, la participation relative du lit majeur est encore plus modeste.

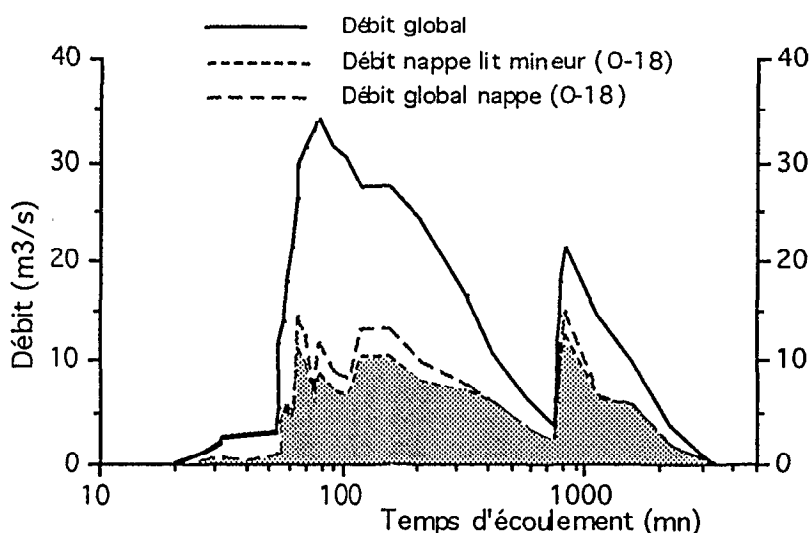


Fig. 4-B.5 Décomposition par O-18 de l'hydrogramme de crue du 28 au 30/7/1990

La figure 4-B.6 présente le résultat de la décomposition suivant le traceur chlore. Les débits marqués par la nappe sont en nette augmentation suivant ce traceur, en particulier au moment de la pointe de crue où ils représentent plus de 80 % des écoulements du premier corps.

Le deuxième corps est, comme dans le cas précédent, plus marqué encore par les rejets de nappe; à tel point qu'une valeur atteint l'incohérence. Ne s'agissant que d'un point, qui pourrait correspondre à une erreur analytique, il est difficile de réfuter la validité de ce traceur. Il

est néanmoins probable que la participation de la nappe qu'il propose soit, comparativement à celle présentée par les isotopes, exagérée, et qu'entre l'eau de pluie et l'eau de la nappe ce traceur ait pu s'enrichir par dissolution de masses solides; ce qui lui retirerait sa compétence pour le calcul de séparation des écoulements.

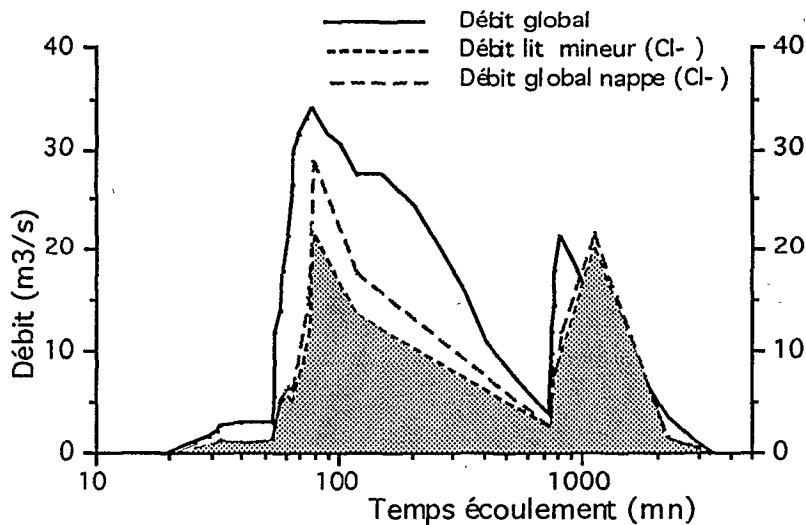


Fig. 4-B.6 Décomposition (par Cl-) de l'hydrogramme de crue du 28 au 30/7/1990

Interprétation:

Les deux traceurs mettent la participation de la nappe en phase avec l'écoulement:

.Durant la première demi heure, les débits du Téloua, qui ne dépassent pas $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, correspondent essentiellement à du ruissellement. La faible proportion, 10 à 20 %, des eaux de restitution, est attestée par la teneur en oxygène-18 des écoulements qui reste proche de celle de la pluie. Le phénomène est confirmé par la conductivité électrique et le chlore (Tableau 4-B.3).

MILIEU	K _{20°} (μs)	Cl- (mg/l)	Oxy-18 (‰)
Nappe	94	2,10	- 2,77
Écoulements	≈ 70	≈ 1,15	≈ - 0,61
Pluie	70	0,43	- 0,19

Tab. 4-B.3 Valeur des signaux au début de la crue du 28 au 30/7/90

Compte tenu du fait que la crue précédente ne date que de 72 heures, cette faible participation de début d'écoulement témoigne de la rapide vidange de la nappe du lit mineur qui se retrouve très vite en état de sous-saturation, mais aussi de la faible pression hydraulique exercée par ces premières eaux issues, à 80 %, du ruissellement des précipitations.

.La phase suivante correspond à une rapide augmentation des débits qui constitue la réponse à l'averse sur la partie intermédiaire du bassin. Le temps de réaction de l'ordre de quatre heures correspond au temps de concentration et à la vitesse de propagation d'une onde de crue moyenne, dans un lit partiellement humecté, sur une vingtaine de kilomètres (Billon et al, 1982; Ribstein et al, 1983; Bricquet et al, 1984).

C'est au cours de cette phase qu'ont lieu les phénomènes de type "piston flow"; la pression hydraulique appliquée à la nappe par la montée des eaux, conduit à des expulsions dont l'importance dépend à la fois de la réserve disponible, c'est à dire de l'état de saturation, et de la pression exercée, donc de la hauteur d'eau dans le lit. La proportion d'eaux de restitutions croît en présentant d'importantes fluctuations liées aux apports ruisselés (la signature de leurs eaux est proche de celle de la pluie) des petits bassins latéraux.

.Les hautes eaux, qui surviennent une heure après le début des écoulements, correspondent à une diminution des apports de la nappe, dont le maximum est intervenu peu de temps avant le débit de pointe du cours d'eau. Cette rupture est produite par le ruissellement du corps de l'averse dans la zone productrice du bassin.

.L'amorce de la décrue est marquée par une participation plus soutenue des eaux infiltrées. La pause qui apparaît dans la décroissance des débits est manifestement liée à cette recrudescence des apports de nappe, qui correspond à une arrivée d'eau différée d'une partie du bassin, plutôt qu'à la vidange gravitaire de la nappe du lit majeur, dont nous avons vu que les mouvements étaient lents.

.Suivent une dizaine d'heures de décrue, dans la nuit du 28 au 29, au cours desquelles les restitutions de la nappe progressent régulièrement. Tout apport par ruissellement étant désormais absent sur le bassin, la proportion d'écoulements participant aux effets "piston flow" augmente.

.Le 29 en fin de matinée la phase de tarissement est interrompue par une brutale remontée des débits qu'accompagne une nouvelle participation souterraine. En absence d'événement pluvieux, cette seconde pointe de crue ne peut être attribuée qu'à un apport retardé du haut bassin. Ce dernier présente peu de développements alluviaux, mais lorsque ses eaux de ruissellement arrivent dans le secteur de Dabaga elles trouvent devant elles un écoulement résiduel qui n'assure plus que la vidange gravitaire des parties les plus élevées de la nappe. En participant massivement à l'effet piston, les eaux "nouvelles" du haut Téloua qui envahissent brutalement le milieu alluvial saturé, sont rapidement et largement marquées par la nappe.

.Ultérieurement à cet effet d'expulsion massif, une lente décrue, sur près de quarante huit heures, vidange la zone saturée des lits mineur et majeur. A ce stade les eaux souterraines impriment leur marque à une proportion sans cesse croissante de l'écoulement.

Le fait que les chlorures, et plus encore les nitrates, expliquent, jusqu'à l'abus une origine souterraine des eaux d'écoulement souligne l'existence d'un stockage, en excès, de ces éléments, à un niveau quelconque de l'interface:

.Les nitrates, dont l'existence dans les eaux de l'Aïr relève, dans une large mesure, de phénomènes de pollution, sont pris en charge en surface, sous forme solide par les ruissellements, avant d'être entraînés vers la nappe en fraction dissoute. Le tarissement du milieu alluvial et l'effet évaporatoire, qui n'est jamais absent sous climat sub-désertique, favorisent les reconcentrations et dépôts de sels dans la partie supérieure de la ZNS.

Dans le cas des chlorures l'effet pollution ne peut guère être retenu, mais le principe reste le même d'un lessivage par les eaux en surface ou dans la ZNS de sels dont la dépôt est lié à l'évaporation.

2) La crue du 13 au 14 août 1990:

a) Cadre d'évolution:

La petite crue du 13-14 août survient 36 heures seulement après la fin d'un autre écoulement d'un demi million de m³. L'arrivée des eaux à 21 heures souligne comme dans le cas précédent la venue d'eaux du bassin intermédiaire. Mais ici la montée des eaux, jusqu'au maximum de 11,3 m³.s⁻¹, s'effectue très progressivement durant plus de trois heures, en raison d'une origine plus lointaine, mais également d'une vitesse de propagation moindre de l'onde, compte tenu de la faiblesse de la crue. La décrue se prolonge jusqu'en fin d'après midi le jour suivant; ce lent tarissement, pour un débit faible, souligne également l'origine lointaine des eaux, et la contribution d'importantes masses alluviales.

b) origine et signaux:

La pluie de Dabaga est la plus importante pour cet évènement hydrologique (An. 4-B.II,6). Les valeurs de ses signaux sont donc retenues comme références d'entrée (Tab. 4-B.4)

Références	Pluie	Oxygène-18 (δ ‰)	Cl- (mg/l)	NO3- (mg/l)
Pluie AZEL	1,6	2,08	0,10	28,3
Pluie DABAGA	6,0	2,71	0,96	0,21
Pluie AOUDERAS	1,2	1,49	1,94	21,6
Piézo 0		-1,38	2,01	7,79
Piézo 1		-2,47	9,47	5,21

Tab. 4-B.4 Valeurs des différents signaux de la crue du 13-14/8/90

pour le calcul. Les débits de pointe n'atteignant pas 12 m³.s⁻¹ les apports de la nappe seront en principe limités à ceux du lit mineur (piézo 0). Les trois signaux retenus précédemment (oxygène 18, chlore et nitrate) seront reconduits dans leur fonction test, et leurs valeurs utilisées comme références.

c) Le calcul:

Il est simplifié puisqu'il ne concerne qu'un niveau piézométrique. L'annexe 4-B.II,2 présente les données et le résultat des calculs illustrés par la figure 4-B.7.

Les résultats apparaissent très cohérents avec l'oxygène 18, dans la mesure où le rapport Q_n/Q (débit nappe / débit du kori) est toujours inférieur à "1"; beaucoup moins avec les chlorures qui produisent quelques excès (an.4-B.II,3); plus du tout avec les nitrates, qui

donnent à la nappe, en permanence, une production de deux à trois cent pourcent du débit global d'écoulement.

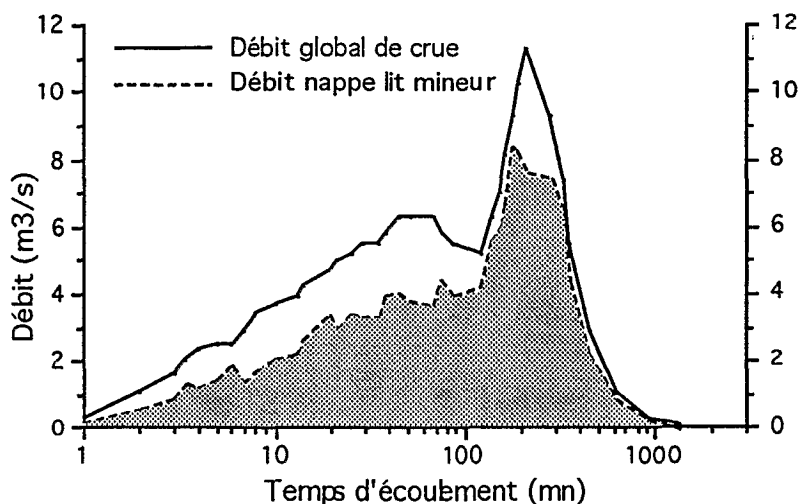


Fig. 4-B.7 Décomposition (utilisant l'oxyg-18) de l'hydrogramme de crue du 13 au 14/8/1990.

d) Commentaire et interprétation:

Les débits associés à des effets souterrains sont sensiblement plus importants que dans le cas précédent. Au cours de la montée, et jusqu'aux débits de pointe, la participation de la nappe, marquée par de nombreuses réactions impulsionnelles liées à des apports latéraux, apparaît toujours au moins équivalente à 60 % de l'écoulement (annexe 4-B.II,3). En décrue le rapport est encore plus favorable aux eaux infiltrées.

Cette crue, rapprochée de la précédente, met en évidence l'importance relative de la nappe alluviale, et ou, un effet piston n'intervenant que sur une partie limitée de cette dernière:

La crue du 28-30/7, malgré un débit de pointe encore modeste ($34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) présentait déjà un rapport favorable aux eaux de ruissellement.

La crue trois fois moins importante du 13-14/8, malgré un potentiel "piston flow" nettement plus faible, affiche une participation accrue de la nappe, qui ne peut être reliée qu'à un état proche de la saturation du milieu alluvial. Etat de saturation qui n'existait plus pour la crue du 28-30/7.

La décomposition de l'hydrogramme utilisant le marqueur chlore apparaît pour cette crue difficilement exploitable en raison: d'un manque manifeste de points, et d'effets indésirables en cours d'évènement, vraisemblablement liés à la dissolution de sels stockés dans la ZNS.

Ce phénomène parasite, encore plus net pour les nitrates, rend leur utilisation inenvisageable.

3) La crue du 14 au 15 août 1990:

a) Cadre de son évolution:

Elle suit immédiatement la crue du 13 au 14, puisque ses premières eaux se surimposent à un écoulement résiduel de 150 l/s. L'heure d'arrivée de cette crue (18 h 45) montre qu'il s'agit d'un événement du proche bassin amont (In Doudou, Razel). Le rapide tarissement (à une heure du matin), d'un débit qui a approché 20 m³/s, montre également que l'averse était circonscrite à la région en question.

b) Origine et signaux:

La pluie de Dabaga (8,3 mm) semble une nouvelle fois constituer la référence (annexe 4-B.II,6) pour cet événement, non confirmé par les postes du bassin d'Acharak, mais bien présent à In Doudou (10,3 mm). Les valeurs des trois signaux, jusqu'alors sélectionnés et retenus pour le calcul, sont extraites de l'annexe précitée (Tab. 4-B.5)

Références	Pluie (mm)	Oxygène-18 (δ ‰)	Cl- (mg/l)	NO ₃ - (mg/l)
Pluie DABAGA	8,3	3,12	0,10	17,48
Pluie AOUDEAS	0,5	6,98	3,61	68,32
Piézo 0		-0,18	1,27	19,54

Tab. 4-B.5 Valeurs des signaux pluie-nappe de la crue du 14-15/8/90

c) Calcul:

L'annexe 4-B.II,4 présente les données du calcul et son résultat. Le débit de cette crue encore modeste ($Q_{\max} = 18,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) montre néanmoins qu'une partie de ses écoulements est lié à la nappe du lit majeur dont il est tenu compte dans le calcul. Les figures de l'annexe 4-B.II,5 permettent de visualiser le résultat du calcul pour l'oxygène 18 et le chlore, les valeurs obtenues à partir des nitrates s'étant révélées, une nouvelle fois, incohérentes.

d) Commentaire et interprétation:

La participation relative de la nappe est la plus importante des trois crues étudiées; à la fois parce que les débits apportés par le ruissellement sont limités, et parce que le milieu alluvial est saturé à l'arrivée de la crue (fig. 4-B.8) extraite de l'annexe 4-B.II,5.

En dessous de 10 m³·s⁻¹, les eaux ayant transité par la nappe représentent, à la crue comme à la décrue, au moins 90 % de l'écoulement. Seul le débit de pointe permet au ruissellement pur de se manifester, et bien que les débits du transit souterrain expliquent encore au moins 75 % de l'écoulement. Les rapides fluctuations de la participation de la nappe, au

moment du maximum, correspondent à des réactions impulsives liées à l'arrivée d'eaux de ruissellement de petits affluents, dans ce secteur "couloir" du bassin du Téloua.

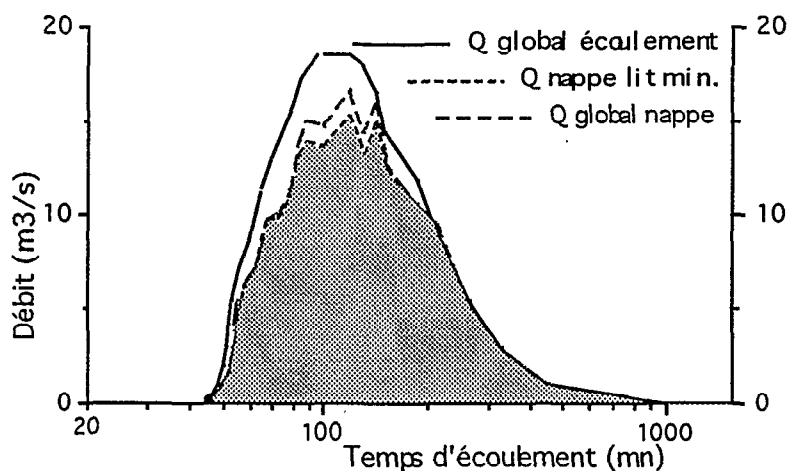


Fig. 4-B.8 Décomposition (utilisant l'oxyg-18) de l'hydrogramme de crue du 14 au 15/8/1990

L'utilisation du chlore comme marqueur est une nouvelle fois décevante. Le signal excessif, enregistré au moment de l'invasion du lit majeur par les eaux de la crue, souligne encore le rôle parasite des sels déstockés, vraisemblablement à proximité de la surface, et remis en solution par les eaux nouvelles.

CONCLUSION:

Les trois crues testées en 1990 ont permis de souligner la qualité de l'outil isotopique comme séparateur des écoulements en milieu subdésertique.

Les conditions climatiques extrêmes, associées au caractère épisodique des écoulements, rendent souvent invalides les autres séparateurs potentiels tels la conductivité, le chlore, ou les nitrates. Car si le principe de la décomposition de l'hydrogramme, par le jeu d'équilibre concentration-volume des différents milieux, est simple, ses conditions de mise en œuvre sont très restrictives, en particulier celle de conservation, qui interdit au signal d'échanger autrement que par jeu de dilution entre phases aqueuses.

La décomposition de l'hydrogramme des trois événements sélectionnés, qui représentent des origines et des conditions variables, montre la permanence et l'importance des participations de la nappe aux écoulements de surface. Ces participations dont on pouvait supposer qu'elles dépendraient, avant tout, du principe de la loi de Darcy qui veut que la quantité percolante dans un milieu sableux soit proportionnelle au gradient de pression, dépendant lui-même des potentiels matriciel (élevé sur le Téloua) et gravitaire, apparaissent surtout dépendantes de l'état des réserves, dont la faiblesse est ainsi implicitement soulignée.

Le rapide tarissement des nappes alluviales, qui s'opère entre deux écoulements, conditionne donc en tout premier lieu leur capacité de restitution ultérieure; tout en concentrant,

sous l'effet de l'évaporation des sels, perturbants pour les traceurs chimiques, mais heureusement sans effet sur le signal isotopique:

. Une petite crue, comme celle du 28-30/7/90 (34 m³/s) qui survient 72 heures après la précédente, voit la nappe participer pour moins de 50 % à ses écoulements,

. Alors qu'une crue plus modeste encore, comme celle du 13-14/8/90 (11,5 m³/s), qui arrive immédiatement derrière celle du 10-12/8, exerce une pression suffisante sur la nappe pour obtenir sa participation à plus de 60 % en phase de crue et à plus de 75 % en décrue.

. La crue intermédiaire du 14-15/8/90, qui se surimpose à Azel à la fin des écoulements de l'évènement précédent, confirme l'importance du milieu saturé sur le phénomène de restitution; plus de 80 % du volume global de la crue paraît ainsi avoir transité par la nappe.

Il semble donc qu'au cours de la propagation d'une crue, les eaux provenant de l'amont participent, en permanence et massivement, à des échanges avec la nappe. En tout état de cause ces mouvements de transfert et d'échange longitudinaux s'imposent dans une large mesure, sur ce type de bassin subdésertique, aux transferts latéraux.

CONCLUSION

Ce travail, dont le but était de faire le point sur la connaissance hydrologique du milieu subdésertique de l'Aïr, a permis de souligner, la particulière gravité du phénomène de sécheresse malgré l'effet de massif, et l'intérêt de l'utilisation des méthodes géochimiques et isotopiques dans l'investigation et la quantification des phénomènes.

Cette étude s'attache d'abord à décrire les conditions particulièrement sévères de l'Aïr; importance des affleurements de la roche mère, indigence des sols et de la végétation qui n'oppose jamais de résistance (directe ou indirecte) ni aux écoulements ni à l'érosion sous toute ses formes.

L'observation des facteurs climatiques montre que cette situation déjà sévère s'est aggravée depuis trente ans; tous les signaux convergent:

- . baisse de la pluviosité dans tous les secteurs du massif, en particulier sur les premiers reliefs au vent qui régénèrent les masses d'air de mousson aux potentialités affaiblies,
- . baisse de l'humidité relative,
- . en relation avec l'augmentation des températures et du régime des vents.

Remarque:

Au début des années "90" un retour à des conditions moins déficitaires aurait été observé sur le massif, au sud (Agadez), comme au nord (Iférouane), sans que l'on puisse préjuger, à partir de quelques hivernages, d'un retour durable à une situation climatique plus favorable.

La conséquence logique de cette aggravation de la sécheresse est un affaiblissement des écoulements qui se traduit, comme pour les pluies, à la fois par des volumes amoindris et par des distributions plus extrêmes. dans la région centre-Aïr un facteur "4" est enregistré dans l'affaiblissement des valeurs médianes et un facteur "8" dans celui des valeurs décennales.

La dynamique fluviale apparaît très empreinte par le milieu alluvial des lits; car si le ruissellement latéral des bassins conserve au rapport P/Lee une valeur minimale, le transfert longitudinal par les grands collecteurs apparaît souvent dégradé (la valeur de P/Lee croit considérablement) en rapport avec le développement du milieu alluvionnaire.

L'étude des transports solides, très fragmentaire jusqu'en 1985 dans l'Aïr, a fait par la suite l'objet d'un suivi très régulier qui permet d'apprécier, dans les conditions actuelles, l'importance et la qualité du transport en suspension.

Ainsi, malgré la diminution du volume des écoulements, le massif apparaît encore soumis à d'importants prélèvements de matière qui atteignent annuellement plusieurs centaines

de tonnes par km². Le transport apparaît homogène, la granulométrie des suspensions est essentiellement limoneuse. Mais un charriage de fond, constaté mais non mesuré, indépendant de l'hydraulicité, existe dans une proportion vraisemblablement supérieure en masse à 10 %. Les concentrations ponctuelles très élevées, jusqu'à plus de 100 g/l, reflètent l'intensité et la capacité d'arrachement du ruissellement sur les versants.

Les études géochimiques et isotopiques, pratiquées sur les eaux de l'Air entre 1988 et 1990, apportent une information significative à la compréhension des phénomènes:

Les isotopes permettent ainsi de préciser à la fois l'origine guinéenne et le caractère toujours évaporé des pluies de l'Air, de même qu'il montre que cet effet évaporatoire s'impose, jusqu'à inverser le schéma habituel, puisqu'altitude et latitude produisent un enrichissement isotopique.

La présence de nitrates à des latitudes supérieures à 20° nord, loin de toute pollution, relève vraisemblablement de phénomènes orageux de haute altitude; comme ceux responsables des pluies au cœur du massif, en liaison avec l'effet radiatif maximum des surfaces altérées et volcaniques.

Les investigations physico-chimiques et isotopiques ont montré que les conditions subdésertiques permettaient de dégager de forts contrastes entre les milieux; contrastes particulièrement propices à souligner les variations dans l'alimentation des écoulements. Ainsi, si le faciès bicarbonaté calcique des eaux de nappe correspond à celui des eaux d'écoulement, le milieu alluvial est aussi le lieu de reconcentrations minérales par hydrolyse des silicates plagioclases, ce qui lui assure une signature distincte de celle des eaux de surface.

L'analyse statistique multidimensionnelle de tous ces facteurs met en évidence la constance des phénomènes; l'acquisition de la minéralisation des premiers écoulements relève toujours des mêmes processus de lessivages et ou de rejets de nappes hydrolysées, alors que le passage des hautes eaux s'accompagne toujours de phénomènes de dilution, et que la fin des écoulements permet des reconcentrations liées à l'évaporation sur des volumes en réduction.

En cours de crue, l'évolution très rapide de la valeur des différents signaux atteste d'une arrivée d'eau nouvelle identifiable à sa minéralisation: faible s'il s'agit d'une eau de ruissellement, plus soutenue s'il s'agit d'une eau de nappe. En début d'écoulement des eaux de ruissellement pourront cependant présenter une minéralisation élevée, correspondant aux lessivages de sels issus d'évaporations de surface ou de subsurface. Dans ce cas, le type d'élément majeur responsable de la minéralisation fera la différence (chlore et sulfates soulignant le ruissellement). La rapidité d'évolution des signaux souligne le caractère massif et instantané de l'arrivée de ces eaux nouvelles qui, lorsqu'elles sont issues de la nappe, ne peuvent correspondre qu'à des expulsions, sous effet "piston".

Les essais de décomposition de l'hydrogramme de crue ont montré que dans cet environnement à fortes contraintes climatiques, seul le traceur isotopique était susceptible de

permettre un calcul de séparation des écoulements. Un élément conservatif comme le chlore, traditionnellement employé dans la séparation de l'hydrogramme en milieu tempéré, se révèle inefficace en raison des fortes contraintes évaporatoires; d'autres minéraux moins conservatifs apparaissant très vite marqués par l'hydrolyse dont le développement est favorisé par la température élevée des eaux.

Quantitativement la participation des eaux souterraines du Téloua apparaît remarquable (40 à 80 % de l'écoulement) compte tenu de la faible potentialité du milieu alluvial. Mais les crues qui ont pu être testées sont modestes ($< 40 \text{ m}^3/\text{s}$), il est certain qu'un évènement de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ aurait considérablement limité le rôle de la nappe, bien qu'exerçant une pression maximale sur le milieu. Pour les crues testées, la participation de la nappe est apparue, avant tout, dépendante de la réserve disponible, donc du temps séparant deux évènements.

Ces résultats ne doivent cependant pas faire perdre de vue que le Téloua en raison de la relative unité de son bassin, de sa nappe alluviale bien délimitée, constitue un milieu favorable à la mise en œuvre de la décomposition de l'hydrogramme. On peut légitimement s'interroger sur son application dans le cas d'un bassin comprenant des milieux alluviaux variés ou étendus, appartenant à des sous bassins dont on prétendrait étudier la participation. Le principe resterait a priori applicable, mais le nécessaire contrôle des sous unités compliquerait très vite l'opération.

Le contrôle de l'ensemble des origines (pluie et nappe), qui permet d'éviter des choix, toujours plus préjudiciables aux résultats que la précision des analyses (puisque l'on travaille sur des concentrations en valeurs relatives) est au moins aussi important que celui des écoulements. Les choix, simplifiés par les circonstances et le caractère ponctuel des averses du milieu, auraient pu être moins évidents pour les pluies du Téloua en 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLISON G.B., 1982** - The relationship between ^{18}O and deutérium in water in sand columns undergoing évaporatio. J. of Hydrology 55, 163-169.
- ALLISON G.B., BARNES C.J., HUGHES M.W., LEANEY F.W.J., 1984** - Effect of climate and vegetation on ^{18}O and deuterium profiles in soils. Int. Symp. Isotope Hydrology in Water Resources Development, IAEA, Vienna, SM 27020, 105-123.
- AMRI M., BOUCHAALA A., GALLAIRE R., BRICQUET J.P., DELFIEU J.M., GATHELIER R., 1986** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1985; ORSTOM Niamey, 112 p.
- ARANYOSSY J. F., JOSEPH A., 1985** - Etude géochimique et isotopique des aquifères de l'Aïr (Niger). A.I.E.A., TA-2330, 43 p.
- ARANYOSSY J. F., 1991** - L'apport des techniques isotopiques à l'éruide de la recharge des aquifères sous contraintes techniques et climatiques extrêmes. Diplôme d'habilitation, Université de Paris-Sud, Orsay, 576 p.
- ARANYOSSY J. F., FILLY A., TANDIA A.A., LOUVAT D., OUSMANE B., JOSEPH A., FONTES J.C., 1991** - Estimation des flux d'évaporation diffuse sous couvert sableux en climat hyper-aride (erg de Bilma, Niger). Proceedings of a Symposium A.I.E.A. Vienna, 11-15 march 1991.
- ARANYOSSY J.F., N'DIAYE B., 1993** - Etude et modélisation de la formation des dépressions piézométriques en Afrique sahélienne. Revue des Sciences de l'eau, 6, pp 81-96.
- ARMAND C., 1986** - Exploitation des eaux souterraines et ressources disponibles. Evaluation de la situation actuelle dans six vallées de l'Aïr. BRGM, Niamey 47 p.
- ARMAND C., DEHAYS H., 1987** - Reconnaissance géophysique par prospection électrique dans six vallées de l'Aïr. B.R.G.M. - Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement du Niger. pp 5-37.
- ARNAUD Y., 1992** - Caractérisation des nuages précipitants en fonction de leur structure spatiale et de leur évolution temporelle en milieu sahélien à partir d'images Météosat. Thèse Université Bordeaux 3.
- BALMER F., MULLER I., 1988** - La nappe alluviale du kori Téloua - Agadez, Niger. Etude hydrogéologique et prospection géophysique électromagnétique. CHYN (Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel). Bull. n°8, 16 p.
- BARIAC T., 1988** - Les isotopes stables, Oxygène 18 et Deutérium de l'eau dans le continuum sol - plante - atmosphère: conséquence pour la vapeur d'eau atmosphérique. Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris VI, 358 p.

- BARNES B.S., 1939** - The structure of discharge recession curves, Trans. Am. Geophys. Un., 20 pp. 721-725
- BARNES C.J., ALLISSON G.B., 1982** - Interprétation of stable isotopes profiles in arid zone soils. Proc. Symp. on Hydrology and Water Ressources, Melbourne, 98 - 101.
- BARNES C.J., ALLISON G.B., 1983** - The distribution of deuterium and oxygen 18 in dry soils. 1. Theory. J. Hydrol., 60, 141.
- BARNES C.J., ALLISON G.B., 1984** - The distribution of deuterium and 18-Oxy in dry soils. 3: Theory for non-isothermal water movement. J. of Hydrology 74, 119-135.
- BARNES C.J., ALLISON G.B., 1988** - Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. J. Hydrol., 100: 143 - 176.
- BARTH H., 1850** - Heinrich Barth chez les Touaregs de l'Aïr. Traduction et commentaires de S. Bernus - Etudes nigériennes n° 28 (1972), 195 p.
- BELTRANDO G., CHARRE J., DOUGUEDROIT A., 1986** - Régionalisation des variations temporelles récentes des précipitations de la zone soudano-sahélienne (de l'océan Indien à l'océan Atlantique). "Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA - ASEQUA Symposium International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. ,n° 197, pp. 25-28.
- BEN ABDELFADEL A., 1984** - Les bassins versants de Timia; étude hydrologique, campagne 1981; rapport ORSTOM, Niamey, 52 p.
- BEN SALAH C., N'TONGA J.C., 1986** - Rapports de stage de deuxième année à l'ORSTOM. Niamey, diffusion interne.
- BENSON C.L.Jr., RAO G.V., 1987** - Convective bands as structural components of Arabian Sea convective cloud cluster. Mon. Wea. Rev., vol. 115, n° 12, pp. 3013-3023.
- BERNERT G., 1979** - Atlas des eaux souterraines du Niger. Analyse bibliographique à la date du 30 avril 1978. Catalogue des forages sélectionnés Tome 2. B.R.G.M., Agence d'études de géologie appliquée à l'étranger. Rép. du Niger, Minist. Mines et Hydraulique.
- BERNERT G., 1980** - Reconnaissance hydrogéologique des vallées de l'Aïr et de sa bordure occidentale. B.R.G.M. (A. E. G. A. E.) -Direction de l'Hydraulique du Niger, 132 p, 16 cartes.
- BERNUS E., 1981** - Touaregs nigériens; unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur. Thèse d'Etat, Edit. ORSTOM-mém. n° 94, 507 p.
- BERTRAND J., 1976** -Visibilité et brume sèche en Afrique. La Météorologie, VI^e série, n° 6, pp. 201-211.
- BEVEN K. J. , CLARKE R. T., 1986** - On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores. Water Resour. Res., 22,3:383-388 .
- BILLON B., 1968** - Mise au point de débits solides en suspension (Rép. du Tchad). Cahier ORSTOM, série hydrologie Vol. 5, n°2, pp 3-14.

- BILLON B., PEPIN Y ., 1981** - Le haut bassin du Téloua; étude hydrologique, campagne 1980, ORSTOM Niamey, 71 p.
- BILLON B., PEPIN Y ., 1982** - Le haut bassin du Téloua; étude hydrologique, campagne 1981, ORSTOM Niamey, 57 p.
- BILLON B., DELFIEU J.M., GATHELIER R., PEPIN Y., RIBSTEIN P., 1983** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1982; ORSTOM Niamey, 60 p.
- BILLON B., 1990** - Recherches sur les écoulements au Niger ; zone de l'Aïr . Document de travail non publié. 63 p.
- BLACK R., JAUJOU M., PELLATON C., 1967** - Notice explicative sur la carte géologique de l'Aïr au 1/ 500 000 . Ed. du BRGM, Paris, 57p,11 fig.
- BLACK R., 1978** - Propos sur le Pan-Africain; Bull. Soc. Géol. Fr. (7) XX, 6, pp. 843-850.
- BLAVOUX B., 1978-** Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilité et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de doctorat d'état ès sciences. Université de Paris VI.
- BOURDEAU B., 1992** - Rapport caractéristique (Br⁻ / Cl⁻) des précipitations sahéliennes.. Approche paléoclimatique. Mémoire de DEA, Université Paris Sud, Orsay.
- BOURRIE G., 1976** - Relations entre le pH, l'Alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. Sciences du sol, 1976 n°3, p. 141-159.
- BOUVIER J.Ch., BILLON B., DELFIEU J.M., GATHELIER R., HARANG P., PEPIN Y., 1982** - hydrologie de la cuvette d'Agadez, campagne 1980; ORSTOM Niamey, 84 p.
- BRICQUET JP., BOUVIER J.Ch., DELFIEU J.M., GATHELIER R., GALLAIRE R., 1984** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1983; ORSTOM Niamey, 58 p.
- BRICQUET JP., BOUVIER J.Ch., DELFIEU J.M., GATHELIER R., 1984** - Le kori Téloua, le haut bassin; étude hydrologique, campagne 1983; ORSTOM Niamey, 55 p.
- BRICQUET JP., BOUVIER J.Ch., DELFIEU J.M., DUBEE G., GALLAIRE R., 1985** - Le kori Téloua, le haut bassin; étude hydrologique, campagne 1984; ORSTOM Niamey, 40 p.
- BRUNET-MORET Y., 1968** - Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Rapport de synthèse, ORSTOM-CIEH, Paris, multigr.
- C.M.S., 1988** - Connaissance de la météorologie. Photographies météorologiques satellitaires; interprétation, utilisation. Centre de météorologie spatiale de Lannion, 43 p.
- CADET D.L, NNOLI N.O.,1987** - Water vapour transport over Africa and the atlantic ocean during summer 1979. Quart. J. Roy. Météor. Soc., 113, pp. 581-602.

- CADET D.L., 1988** - Préviation du temps : une éclaircie sous les tropiques. La Recherche, vol. 19, n° 195, pp. 118-120.
- CAINE N., 1989** - Hydrograph Separation in a small alpine basin based on inorganic solute concentrations. J. of Hydrol., Vol. 112, p., 89 -102.
- CARBONEL J.P. , HUBERT P. , 1985-** Sur la sécheresse au Sahel en Afrique de l'Ouest . Une rupture climatique dans les séries pluviométriques au Burkina-Faso . C.R.A.Sc. Paris t.301, série II, n° 13, p. 941-944.
- CHARRE J., 1974** - Le climat du Niger . Thèse de troisième cycle, Grenoble, 188 p.
- CHEVALLIER P., 1982** - Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi - Hte Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 4.
- CHORLEY R. J., 1978** - The hillslope hydrological cycle . In: M. J. Kirkby (editor) Hillslope Hydrology. John Wiley et Sons : 1-41
- CHOURET A., 1975** - Etude des transports solides en suspension au Tchad. Campagnes 72 à 75 et bilan de sept années d'observations (68-74) ORSTOM N'Djamena.
- CITEAU J., GUILLOT B. et LAHUEC J. P., 1985** - champs thermiques de surface de l'océan Atlantique. convection et fronts thermiques sur le continent africain. Essai de mise en relation S. I. D. T. n° 66, Télédétection 11, O. R. S. T. O. M., Paris, 39 p
- CITEAU J., CAMMAS J. P., GOURIOU Y., GUILLOT B., 1986** - Remarques sur la migration de la zone intertropicale de convergence en Atlantique, les températures de surface du Golfe de Guinée et la pluviométrie en Afrique de l'Ouest Sahélienne et au Nord-Est du Brésil. "Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symposium International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. ,n° 197, pp. 67-75.
- CITEAU J., MAHE G., DEMARCQ H., 1991** - Dynamique de la zone intertropicale de convergence et climat des régions sahéliennes. Pêcheries Ouest Africaines; Editions de l'ORSTOM, Paris, pp. 141-146.
- COLEMAN M.L., STEPHEN T.J., DURHAM J.J., ROUSSE J.B., MOORE G.R., 1982** - Reduction of water with zing for hydrogen analysis. Anal. chem., 54, pp. 993-995.
- COLLINET J., VALENTIN C., 1979** - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n° 4.
- CONRAD G., FONTES J. Ch., 1970** - Hydrologie isotopique du Sahara Nord-occidental. In : "Isotope Hydrology 1970". I.A.E.A.,Vienna, pp. 405-419.
- COUDE-GAUSSEN G., ROGNON P., 1983** - Les poussières sahariennes. La Recherche, vol.14,n°147,pp.1050-1061.

- COUREL M. F., 1986** - Variations récentes de l'albédo de surface dans les régions sahéliennes et critique du mécanisme biogéophysique de Charney. "Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symposium International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. ,n° 197, pp. 87-90.
- CRAIG H., 1961** - Isotopique variations in météoric waters. Science, vol. 133, p. 1701-3.
- CRAIG H., GORDON L.Y., HORIBE Y., 1963** - Isotopic Exchange Effects in the Evaporation of Water. Journal of Géophysical Research, Vol. 68, n° 17, 5078-5087.
- DANSGAARD W., 1964** - Stables isotopes in precipitations . Tellus, XVI, Vol.4 (436-468)
- DE FELICE P., VILTARD R., CAMARA M., 1982** - Vapeur d'eau dans la troposphère en Afrique de l'ouest. La météorologie, VI, 29, pp. 129-134.
- DELMAS A.B., 1979** - Etude expérimentale du phénomène de dissolution des sels et des silicates, approche cinétique. Thèse doctorat ès sciences, Univ. Paris VI, pp. 256.
- DESBOIS M., KAYIRANGA T., GNAMIEN B., GUESSOUS S., PICON L., 1988** - Characterization of Some Elements of the Sahelian Climate and their Interannual Variations for July 1983, 1984 and 1985 from the Analysis of METEOSAT ISCCP Data. 38 p.
- DHONNEUR G., 1978** - Traité de météorologie tropicale. Météorologie Nationale, Paris, 160 p.
- DHONNEUR G., 1985** - Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale. Direction de la météorologie, 151 p.
- DINCER T., 1968** - Précipitations - Runoff relations. Technical reports series n° 91, A.I.E.A., Vienne, p. 184-190.
- DINCER T., 1980** - Use of environmental isotopes in arid-zone hydrology, in Panel Proceedings Series A.I.E.A., Vienne 1980.
- DORIZE L., 1974** - L'oscillation pluviométrique récente sur le bassin du lac Tchad et la circulation atmosphérique générale. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., (2), vol. XVI, fasc. 4, pp. 393-420.
- DORIZE L., 1976** - L'oscillation climatique actuelle au Sahara. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., (2), vol. XVIII, fasc. 2-3, pp. 217-228.
- DRAY M. , GONFIANTINI R., ZUPPI G.M., 1983** - Isotopic composition of groundwater in the southern Sahara. Paleoclimates and paleowaters: a collection of environmental isotopes Studies. IAEA, Proc. of an Advisory Group Meeting; Vienne.
- DRAY M. , SARROT-RAYNAULD J. , ZUPPI G.M. , 1987-** Les isotopes du milieu dans l'étude des aquifères de l'Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne . Meeting AIH, Rome.
- DUBAR C., 1988** - Eléments de paléohydrologie de l'Afrique Saharienne : les dépôts quaternaires d'origine aquatique du Nord-Est de l'Aïr (Niger, PALHYDAF site 3). Thèse Université Paris Sud, 184 p.

- DUBIEF J., 1952** - Le vent et le déplacement du sable au Sahara. Travaux de l'Institut de recherches sahariennes, t. VIII, pp. 123-165.
- DUBIEF J., 1953** - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Birmandreis (Alger) 458 p.
- DUBIEF J., 1959-1960** - Le climat au Sahara. Mémoire hors-série, Institut de Recherche Saharienne, Alger, 2 Tomes.
- DUBREUIL P., 1970** - Le rôle des paramètres caractéristiques du milieu physique dans la synthèse et l'extrapolation des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs. Colloque AIHS - Unesco, Wellington, pp 583-590.
- DUBREUIL P., 1972** - Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM (an. 1951-1969) Masson, Paris, 916 p.
- DUBREUIL P., 1974** - Initiation à l'analyse hydrologique. Masson, ORSTOM, Paris, 216 p.
- DUNNE T., 1978** - Field studies of hillslope flow processes . In j. Kirkby (editor) Hillslope hydrology . John Wiley & Sons : 227-293
- DUNNE T., 1983** - Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff . n: I Rodriguez-Iturbe and V. K. Gupta (guest-editors), scale problems in hydrology. J.Hydrol., 65: 25 - 48
- DURAND A., LANG J., MOREL A., ROSET J. P., 1983** - Evolution géomorphologique, stratigraphique et paléoclimatique au Pléistocène supérieur et à l'holocène de l'Aïr oriental (Sahara méridional, Niger). Rev. Géol. Dyn. et de Géogr. Phys., vol. 24, fasc. 1, pp. 47-59.
- EPSTEIN S., MAYEDA T., 1953** - Variation of O-18 content of waters from natural sources, geochim. Cosmochim. Acta 4, 213.
- ERIKSSON E., 1983** - Stable isotopes and tritium in precipitation. Guide book on nuclear techniques in hydrology. Techn. Rep. Series n° 91 , A.I.E.A., Vienna, 19-27
- FAURE H., 1967** - Le problème de l'origine et de l'âge de l'eau des oasis sahariennes du Niger. Mém. Réunion de l'A.I.H., 1965, vol. VII, pp. 277-278.
- FONTAINE B., PERARD J., 1986** - Irrégularité des pluies et dynamique de l'atmosphère en Afrique de l'ouest : comparaison des périodes 1953-1963 et 1968-1975."Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symp. International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc., n° 197, pp. 139-144.
- FONTAINE B., 1989** - Pluviométrie sahélienne et dynamisme atmosphérique ouest-africain. In: les hommes face aux sécheresses. Nordeste brésilien; Sahel africain, pp. 43-52.
- FONTES J.C., YOUSFI M., ALLISON G.B., 1966** - Estimation of long-term, diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in soil water. J. Hydrology, 86, 315.

- FONTES J. Ch. et GONFIANTINI R., 1967** - Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens. *Earth and Planetary Science Letter*, vol. 3, n° 3, pp. 258-266.
- FONTES J. Ch., OLIVRY J. Cl., 1976** - Gradient isotopique entre 0 et 4000 mètres dans les précipitations du Mont Cameroun. *C.R. réunion ann. Sc. Terre, Paris, Soc. géol. Fr.*, 171.
- FONTES J. Ch., 1976** - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse d'état, Université Paris VI, 208 p.
- FONTES J. Ch., 1976 a** - Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. *La Houille Blanche*, n° 3-4, pp. 205-221.
- FONTES J. Ch., 1978** - Hydrogéologie, un champ privilégié de l'application des isotopes du milieu : l'âge de eaux souterraines. *I.H.E.S. Sympo., Montpellier, Sept 1978*, 35p.
- FONTES J. Ch., 1980** - Introd. to "Handbook of Environmental isotope Geochemistry". Ed. P. Fritz et J.Ch. Fontes, Elsevier, Amsterdam, Vol. 1, A. The Terrestrial Environment, 1-19.
- FONTES J. Ch., EDMUNDS W. M., 1989** - The use of environmental isotope techniques in arid zone hydrology, a critical review. *Technical documents in Hydrology, UNESCO, Paris*.
- FONTES J. Ch., 1994** - Isotope palaeohydrology and the prediction of long-term repository behaviour. *Terra Nova*, vol. 6, n° 1, 20-35.
- FRANGI J.P., 1986** - Contribution à l'étude de l'atmosphère du Sahel. *Veille Climatique Satellitaire, ORSTOM, Direction de la Météorologie*, n°11, pp. 67-69.
- FRITZ B., 1975** - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse de docteur ingénieur de l'Université de Strasbourg. *Sciences géologiques*, n° 41, 144 p.
- FRITZ P., CHERRY J.A., WEYER K.U., SKLASH M., 1975** - Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions. *Group meeting Vienna du 27-31/1*, p.111-130.
- FRITZ P., FONTES J.Ch. 1980** - *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Elsevier Scientific Publishing Compagny. Amsterdam-Oxford-New York.
- FRITZ P., MATTHESS G., BROWN R.M., 1975** - Deuterium and oxygene 18 as indicator of leachwater movement from a sanitary landfill. *Group meeting vienna (27-31 janvier)*. pp.131-142.
- FRITZ P., 1981** - River waters in "Stable Isotope Hydrology", *Techn.Rep.Series n° 210. AIEA, Vienne*, pp. 177-202.
- FURON R., 1960** - *Géologie de l'Afrique*. Payot, Paris, pp 222-226.
- GALLAIRE R., BRICQUET J.P., DELFIEU J.M., DUBEE G., BOUVIER J.Ch., GATHELIER R., 1985** - Le bassin du kori Téloua, les stations en aval d'Azél; étude hydrologique, campagne 1984; *ORSTOM Niamey*, 41 p.

- GALLAIRE R., BRICQUET J.P., DELFIEU J.M., GATHELIER R., 1986** - Le haut bassin du kori Téloua; étude hydrologique, campagne 1985; ORSTOM Niamey, 46 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., GATHELIER R., 1987** - Le haut bassin du kori Téloua; étude hydrologique, campagne 1986; ORSTOM Niamey, 42 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., GATHELIER R., 1987** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1986; ORSTOM Niamey, 84 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., TEHET R., 1988** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1987; ORSTOM Niamey, 61 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., TEHET R., 1989** - Le haut bassin du kori Téloua; étude hydrologique, campagne 1987; ORSTOM Niamey, 33 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., TEHET R., 1989** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1988; ORSTOM Niamey, 75 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., TEHET R., 1990** - Le haut bassin du kori Téloua; étude hydrologique, campagne 1988; ORSTOM Niamey, 38 p.
- GALLAIRE R., GREARD M., TEHET R., 1990** - Le kori Téloua, les stations en aval d'Azal; étude hydrologique, campagne 1989; ORSTOM Niamey, 68 p.
- GALLAIRE R., TEHET R., FONTES J.Ch. 1990** - Essai de caractérisation thermique, chimique et isotopique des crues en milieu aride d'altitude: L'Aïr (NIGER). XXII^e Congrès AISH - Ingénieurs et Architectes suisses N° 18.
- GALLAIRE R., FONTES J.Ch., ZUPPI G.M. 1995** - Isotopic characterization and origin of rainwater on the Aïr massif (Niger). In Application of Tracers in Arid Zone Hydrology; Eilon M. Adar and Christian Leibundgut edirors; IAHS Publ. n°232, pp. 293-302
- GALLAIRE R., FONTES J.Ch., ZUPPI G.M. 1995** - Mise en évidence des contributions respectives aux écoulements en milieu subdésertique d'altitude: le Téloua (Aïr, nord Niger). Symposium AIEA-UNESCO "Isotopes in water resources management" Vienne 20-24/3.
- GALLAIRE R., 1995** - Données sur les transports du Niger moyen entre Kandadji et Niamey. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM nov. 1993. ORSTOM éditions, série colloque et séminaire, pp. 317-332.
- GARNIER J.M., FONTES J.Ch., 1980** - Reconnaissance hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette d'Agadez (Niger). Rapport O.R.S.T.O.M.
- GARRELS R.M., CHRIST C.L., 1967** - Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier-Villars, Paris, 335p.
- GASSE F., TEHET R., DURANT A., GIBERT E., FONTES J.Ch., 1990** - The arid-humid transition in the Sahara during the last deglaciation. Nature, 346: 141-146

- GAT J.R., 1980** - The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation in " Handbook of Environmental Isotope Geochemistry", Fritz and Fontes (Eds), Vol.1, Elsevier, Amsterdam, 21-47, 227-258.
- GAT J.R., GONFIANTINI R., 1981**- Stable isotope hydrology, Deuterium and oxygen 18, in the water cycle. Technical reports series n° 210. I.A.E.A. Vienna, 337p.
- GAT J.R., TZUR Y., 1967** - Modification of the isotopique composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge. Proceeding I.A.E.A. Symposium on isotopes in hydrology, Vienna, pp. 49-60.
- GIAZZI F., 1990** - Ressources en eau, milieux naturels et aménagement des vallées d'oued en zone endoréique sub-désertique. Thèse géographie, Grenoble I, 457 p.
- GIROD M., 1971** - Le massif volcanique de l'Atakor (Hoggar, Sahara algérien): étude pétrographique, structurale et volcanique. CNRS-CRZA, série géologique n° 12, Paris.
- GONFIANTINI R., 1978** - Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271, 534.
- GONFIANTINI R., 1985** - On the isotopic composition of precipitation in tropical station. *Acta Amazonica* 15, pp 121-139.
- GONFIANTINI R., 1995** - On the isotopic composition of precipitation. A paraître dans le compte-rendu des journées J.Ch. FONTES (1-2 juin 1995) Académie des Sciences, Paris.
- GREIGERT J., POUUNET R., 1967** - Essai de description des formations géologiques de la république du Niger. Ministère des Travaux Publics, des Transports, des Mines et de l'Urbanisme. Direction mines et géologie. Publication n° 3 Edit. du B.R.G.M., 273p.
- GRIFFITHS J.F., 1972** - World Survey of Climatology, volume 10. Texas A and M University. Elsevier Publishing Company. Amsterdam, London, New York.
- GUILLOT B., CARN M., 1988** - Remarques à propos de l'effet des facteurs locaux sur l'activité convective en Afrique de l'ouest et dans l'Atlantique intertropical. *Veille climatique satellitaire*, n° 21.fév.88.
- HARANG P., HOEPPFNER M., DUBEE G., PEPIN Y., 1980** - Les bassins versants d'Iférouane et de Timia; étude hydrologique, campagnes 1978 et 1979; ORSTOM Niamey, 138 p.
- HEWLETT J. D., 1974** -Comments on letters to "role of subsurface flow in generating surface runoff, 2, Upstream source areas" by R. Allan Freeze. *Water Resour. Res.*,10: 605-607.
- HEWLETT J. D., HIBBERT A. R., 1967** - Factors affecting the reponse of small watersheds to precipitation in humid areas. In *Forest hydrology*, Sopper W. E. and Hull H. W. Ed., Pergamon press : 275-290.
- HILLEL D., 1988** - L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Academia, Louvain - la-Neuve, pp. 294

- HOEPFFNER M., LE GOULVEN P., DELFIEU G., 1976** - Les bassins versants d'Iférouane; étude hydrologique, campagne 1975; ORSTOM Niamey, 49 p.
- HOEPFFNER M., LE GOULVEN P., BOUCHEZ J.M., CALVEZ R., 1977** - Les bassins versants de Timia; étude hydrologique, campagne 1976; ORSTOM Niamey, 98 p.
- HOEPFFNER M., LE GOULVEN P., DELFIEU J.M., 1977** - Les bassins versants d'Iférouane; étude hydrologique, campagne 1976; ORSTOM Niamey, 89 p.
- HOEPFFNER M., LE GOULVEN P., CALVEZ R., DELFIEU J.M., 1978** - Les bassins versants d'Iférouane et de Timia; étude hydrologique, campagne 1977; ORSTOM Niamey, 115 p.
- HOEPFFNER M., 1978** - Les bassins versants de Tabelot; étude hydrologique, campagne 1977; ORSTOM Niamey, 66 p.
- HOEPFFNER M., DELFIEU J.M., GARRETA Ph., 1979** - Les bassins versants de Tabelot; étude hydrologique, campagne 1978; ORSTOM Niamey, 49 p.
- HOEPFFNER M., DELFIEU J.M., 1980** - Les bassins versants de Tabelot; étude hydrologique, campagne 1979; ORSTOM Niamey, 44 p.
- HOEPFFNER M., LE GOULVEN P., DELFIEU J.M., 1980** - La cuvette d'Agadez; étude hydrologique, campagne 1977; ORSTOM Niamey, 86 p.
- HOEPFFNER M., LE GOULVEN P., DELFIEU J.M., 1980** - La cuvette d'Agadez; étude hydrologique, campagne 1978; ORSTOM Niamey, 88 p.
- HOEPFFNER M., PEPIN Y., 1980** - Le haut bassin du Téloua; étude hydrologique, campagne 1979; ORSTOM Niamey, 68 p.
- HOEPFFNER M., DUBEE G., PEPIN Y., 1981** - La cuvette d'Agadez; étude hydrologique, campagne 1979; ORSTOM Niamey, 122 p.
- HOOPER R.P., SHOEMAKER C.A., 1986** - A comparison of Chemical and Isotopic Hydrograph Separation. *Wat. Res. Res.*, vol. 22, n° 10 p. 1444 - 1454.
- HORTON R. E., 1933** - The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14: 446-460
- HUBERT H., 1919** - Sur la prévision des grains orageux en Afrique occidentale. *C.R.Acad.Sc. Paris* t.168, n°11, pp. 567- 570.
- HUBERT P., CARBONNEL J. P., 1986** - Approches statistiques de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest. "Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symposium International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. n° 197, pp. 199-202.
- HUBERT P., 1989** - La séparation de l'hydrogramme. Apport des méthodes isotopiques. *Hydrogéologie*, n° 3, pp. 143-150

- I.A.E.A., 1969,1970,1971,1973,1975,1979,1983,1986,1990, - World Survey of Isotope Concentrations in Precipitation: Technical report Series N° 69, 117, 129, 147, 165, 192, 226, 264, 311. IAEA, Vienne.**
- I.A.E.A., 1981 - Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation. Technical Reports series, n° 206, I.A.E.A., Vienna.**
- I.A.E.A., 1992 - "Statistical treatment of data environmental isotopes in precipitation". Technical Report Series n° 331, Vienne, 720 p.**
- I.A.E.A., 1993 - Les ressources en eau au Sahel, Etudes hydrogéologiques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest par les techniques isotopiques. Agence Internationale de l'Energie Atomique, TECDOC-721, Vienne.**
- JANICOT S., 1990 - Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. Doctorat, Université Paris VI.**
- JOSEPH A., ARANYOSSY J. F., 1986 a - Etude géochimique et isotopique des aquifères de la plaine de l'Irhazer. I.A.E.A. NER/8/003. Report of an expert mission. Division of technical assistance and co-operation. 33 p.**
- JOSEPH A., OUSMANE B., 1986 b - Recharge et paléorecharge des aquifères discontinus du socle de l'Aïr et du Liptako (Niger)."Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symposium International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. n° 197, pp. 213-216.**
- JOSEPH A., ARANYOSSY J. F., 1989 - Mise en évidence d'un gradient de continentalité inverse en Afrique de l'ouest en relation avec les lignes de grain. Hydrogéologie, n° 3, pp.215-218.**
- JOSEPH A., FRANGI J.P., 1989 - Modélisation d'une recharge effective de nappe alluviale en région sub-désertique: cas de l'oasis du Téloua, Niger. Journal of African Earth Sciences, vol. 9 n° 2 pp 317-326.**
- JOSEPH A., 1990 - Recharges et paléorecharges des nappes en région sub-désertique au Niger. Thèse de l'Université Paris VI, 163 p.**
- JOSEPH A., ARANYOSSY J.F., KANTA I., 1990- Recharges et paléo-recharges des aquifères discontinus du socle de l'Aïr. Géodinamica Acta (Paris) 1990, 4,3, 185-197.**
- JOSEPH A., FRANGI J.P., ARANYOSSY J.F., 1992- Isotope Characteristics of Meteoric Water and Groundwater in the Sahelo-Sudanese Zone. Journal of Geophysical Research, vol 97. NO.D7, pages 7543-7551.**
- JOUSSAUME S., 1983 - Modélisation des cycles des espèces isotopiques de l'eau et des aérosols d'origine désertique dans un modèle de circulation générale de l'atmosphère. Thèse 3ème cycle Paris VI.**
- JUNGE C.E. 1963 - Air chemistry and radioactivity. Academic Press, N-York & London, 365p.**

- KANAMITSU M., KRISHNAMURTI N., 1978** - Northern summer tropical circulations during drought and normal rainfall months. *Mon. Wea. Rev.*, 106, pp. 331-347.
- KARCHE J.P., 1978** - Quelques conséquences des nouvelles données géochronologiques sur les complexes annulaires du Niger. *Ann. Univ. Niamey*; tome I, pp.113-119.
- KARCHE J.P., VACHETTE M., 1978** - Age et migration de l'activité magmatique dans les complexes paléozoïques du Niger; conséquences. *Bull. Soc. géol. France.* (7) t. XX n° 6, pp. 941-953.
- KARCHE J.P., 1979** - Remarques morphologiques et structurales sur le massif volcanique du Todgha (sud de l'Air). *Ann. Univ. Niamey*; tome II , pp. 97-108.
- KARPOFF R., 1965** - Les grandes époques de fracture et de bombement du Sahara central. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (7) VII, pp. 169-173.
- KENNEDY V.C., KENDAL C., ZELLWEGER G.W., WYERMAN T.A., AVANZINO R. J., 1986** - Determination of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole River basin; California. *J. Hydrol.*, vol.84, p. 107-140.
- KIRKBY M., 1988** - Hillslope runoff processes and models. *J. Hydrology.*, 100 : 315-339
- LAFFORGUE A., 1977** - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, série hydrol.*, vol.XIV, n° 4.
- LAMBERGEON D., DZIETARA S., JANICOT S., 1981** - Comportement du champ de vent sur l'Afrique occidentale. *La Météorologie*, série VI, n° 25, 69-82.
- LAHUEC J.P., CARN M., 1988** - Convergence intertropicale: intensité de la convection de juillet à septembre 1988. *Veille Climatologique Satellitaire* n° 24, septembre; ORSTOM-METEO FRANCE, pp 11-20.
- LAHUEC J.P., CARN M., 1990** - Convergence intertropicale: intensité de la convection en août et septembre 1990. *Veille Climatologique Satellitaire* n° 34, septembre; ORSTOM-METEO FRANCE, pp 5-12.
- LAHAYE J.P., 1980** - Etude des pluies journalières de fréquence rare dans les Etats-Membres du C.I.E.H. Synthèse régionale des valeurs réduites des pluies maximales annuelles. *Aspects théoriques.* CIEH Ouagadougou, 58 p.
- LE GAL LA SALLE C., 1990** - Etude des précipitations nigériennes. *Mém. DEA, Université Paris-Sud, Orsay*, 58 p. + annexes.
- LEBEL T., BOYER J.F., 1987** - Utilisation du logiciel Dixlois en hydrologie. ORSTOM, Montpellier, 45 p.
- LEBEL T., CASENAVE F., GATHELIER R., GREARD M., GUALDE R., KONG J., VALERO T., 1991** - Epsat-Niger, campagne 1990. ORSTOM-DMN, Niamey, 66 p.

- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPFFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., HUBERT P., 1991** - Expérience Epsat-Niger; Hydrologie continentale, vol. 6, n°2, pp 133-143.
- LEFEVRE R., 1960** - Etudes d'écoulement dans le massif de l'Aïr - Alimentation en eau de la zone des grès d'Agadez. Campagne 1959, ORSTOM - Niger, 128p
- LEFEVRE R., 1961** - Etudes d'écoulement dans le massif de l'Aïr, campagne 1960, ORSTOM - Niger, 84p
- LE GOULVEN P., DELFIEU G., 1977** - Le Téloua à Azel; campagnes hydrologiques 1975 et 1976; ORSTOM Niamey, 39 p.
- LEROUX M., 1983** - Le climat de l'Afrique tropicale. Editions Champion, Paris, 633 p.
- LEROUX M., 1986** - Les mécanismes des changements climatiques en Afrique."Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symp. International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. n° 197, pp. 255-259.
- LEROUX M., 1987a** - L'interdépendance des phénomènes climatiques, la circulation générale de l'atmosphère.Sém. Lab. de Géol. du Quat., Marseille
- LEROUX M., 1987b** L'anticyclone mobile polaire, relais des échanges méridiens; son importance climatique. Géodynamique 2, (2), 162-167
- LEVIN M., GAT J.R., ISSAR A., 1980**- Precipitation, flood and groundwaters of the Negev highlands: An isotopic study of desert hydrology. In panel proceedings series, IAEA, Vienne.
- LEZINE A. M., 1989** - Le Sahel : 20 000 ans d'histoire de la végétation. Bull. Soc. Géol. France, (8), t. V, n° 1, pp. 35 - 42.
- LOYE-PILOT M.D., JUSSERAND C., 1990** - Décomposition chimique et isotopique d'un hydrogramme de crue d'un torrent méditerranéen - Réflexions méthodologiques. Revue des Sciences de l'eau, 1990 (3) pp. 211-231.
- MAGARITZ M., GAT J.R., 1981**- Review of the natural abundance of hydrogen and oxygen isotopes. Stable isotope hydrology, techn. rep. series n° 210,A.I.E.A. Vienna, p.85 - 98.
- MAHE G., 1992** - Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse Université Paris XI.
- MAHE G., CITEAU J., 1993** - Relations océan - atmosphère - continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. Veille Climatologique Satellitaire, ORSTOM - METEO FRANCE, mai.
- MAHE G., DEMARCO H., CITEAU J., 1990** - Evolution des températures de surface de l'upwelling équatorial atlantique de 1964 à 1988. Veille Climat. Satellitaire, n° 33, pp 37-43.

- MAINGUET M., 1977** - Analyse quantitative de l'extrémité sahélienne du courant éolien transporteur de sable au Sahara nigérien. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 285, sér. D, n° 10, pp 1029 -1032.
- MAINGUET M., CANON L., 1976** - Vents et paléovents du Sahara. Tentative d'approche paléoclimatique. Rev. Géog. Phys. et Géol. Dyn., (2), vol. XVIII, fasc. 2-3, pp. 241- 250.
- MAJOUBE M., 1971** - Fractionnement en oxygène 18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur, J. Chim. Phys., 69, 1423 -1436.
- MALEY J., 1981** - Etudes palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique tropicale de 30000 à l'époque actuelle. Travaux et documents n° 129, ORSTOM Paris, p 451-516.
- MALEY J., 1982** - Histoire de la végétation et du climat de l'Afrique nord-tropicale au Quaternaire récent. Comptes rendus des séances du X^{ème} congrès de l'AETFAT (Prétoria)
- MATHIEU R., 1993** - Apports de la géochimie isotopique (²H et ¹⁸O) à l'étude des mouvements de l'eau dans les sols argileux. Modélisation, étude expérimentale et application au milieu naturel (Burkina Faso). Thèse Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI)
- MATHIEU R., BARIAC T., FOUILLAC C., GUILLOT B., MARIOTTI A., 1993-** Variation en isotopes stables dans les précipitations en 1988 et 1989 au Burkina Faso; apports de la météorologie régionale. ORSTOM-METEO FRANCE, Veille Climatique Satellitaire N°45.
- MERLIVAT L., JOUZEL J., 1979** - Global climatic interpretation of the deutérium-oxygen 18 relationship in precipitation. J. Geophys. Research, 84,C8, 5029-5033.
- MEROT Ph., BOURGUET M., LE LEUCH M., 1981** - Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18 mesuré dans les pluies , le sol, le ruisseau. ,Catena, 8: 69-81
- MONTENY B., CASENAVE A, 1981** - Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. Agricultural Meteorology, 23: 45 - 59
- MOOK W.G., GROENVELT D.J., BROWN A., VAN GAUSWIJK A.J., 1974-** Analysis of a runoff hydrograph by means of natural Oxygen 18. Proc. I.A.E.A. Symp. Isot. Tech. Groundwater hydrol.,Vol.1, Vienne, 145-153.
- MOREAU C., 1982** - Les complexes annulaires anarogéniques à suites anarthositiques de l'Aïr central et septentrional (Niger), thèse d'état, Nancy, 356 p.
- MOREL A., 1981** - Formes, formations superficielles et variations climatiques récentes dans les massifs de l'Aïr (Sud-Sahara). Palaeoecology of Africa and the surrounding islands, vol. 13, J. A. COETZEE and E. M. VAN ZINDEREN BAKKER SR (eds), A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 189-198
- MOREL A., 1984** - Les hauts massifs de l'Aïr et leurs piemonts; étude géomorphologique. Thèse d'état, Université de Niamey / Institut de géographie alpine, Grenoble, 404 p.

- MOREL A., 1986** - L'apport des glacis anciens de l'Aïr (Niger) à la connaissances des variations climatiques du pléistocène inférieur d'Afrique occidentale. "Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire, passé, présent et futur", INQUA-ASEQUA Symposium International Dakar, Ed. de l'ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. n° 197, pp. 321-325.
- MOSER H., RAINER V., RANK D., STICHLER W., 1976**- Results of measurements of the content of deuterium, oxygen 18 and tritium in water samples from test area taken during 1972-1975, Underground water tracing, investigations in Slovenia, Ljubljana Bled 93
- NAKAMURA R., 1971** - Runoff analysis by electrical conductance of water. *J. Hydrology*, 14:197-212.
- NEWBY J.E., 1982** - La réserve naturelle nationale de l'Aïr et du Ténéré, UICN-WWF, Rép. du Niger, 123 p.
- NEWBY J.E., TCHOLLI A., CANNEY S., 1990** - Lexique de la faune et de la flore de la Réserve naturelle nationale de l'Aïr et du Ténéré. WWF/ IUCN, Imp. Nat. du Niger, 31 p.
- NOUVELOT J-F., 1969** - Mesure et étude des transports en suspension au Cameroun. Cahier ORSTOM Hydro, vol VI, n°4.
- OUSMANE B., FONTES J.C., ARANYOSSY J., JOSEPH A., 1984** - Hydrologie isotopique et hydrochimie des aquifères discontinus de la bande sahélienne et de l'Aïr (Niger). AIEA, SM (Vienne) 270/ 59, pp 367-395.
- OLIVRY J.C., 1977** - Transports solides en suspension au Cameroun. In *Erosion and solid matter Transport in Inland Watters. Proc. Symp. Paris, AISH, publ. n° 122*, pp. 134-141
- PAYNE B.R.; 1981** - Practical applications of stable isotopes to hydrological problems. In "Stable isotope hydrology" Techn. reports, series n°210, IAEA, Vienne, pp.303-320.
- PEARCE A. J., STEWART M. K., SKLASH M. G., 1986** - Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1 .where does the water come from. *W. Res. Res.*, 22(8): 1263-72
- PEDELABORDE P., 1976** - Bilan d'énergie, bilan hydrique et circulation atmosphérique du Sahara. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.*, (2), vol. XVIII, fasc. 2-3, pp. 229-240.
- PETERS M., TETZLAFF G., JANSSEN W., 1989** - Rainfall intensity of west africa squall lines. *Ann. Geophys.*, 7, (3), pp. 227-238.
- PILGRIM D.H., HUFF D.D., STEELE T.D., 1979** - Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff. *Wat. Res. Res.*, 15: 329-339.
- PINDER G.F., JONES J.F., 1969** - Determination of the grounwater component of peak discharge form the chemistry of total runoff. *Wat. Res. Res.* 5: 438-445.
- PLATA BEDMAR A., ARANYOSSY J.F., JOSEPH A., 1989** - Etude de la nappe alluviale du kori Teloua (Agadez, Niger) à l'aide des techniques isotopiques. Project RAF/ 8 / 012, AIEA, Vienne, 46 p.

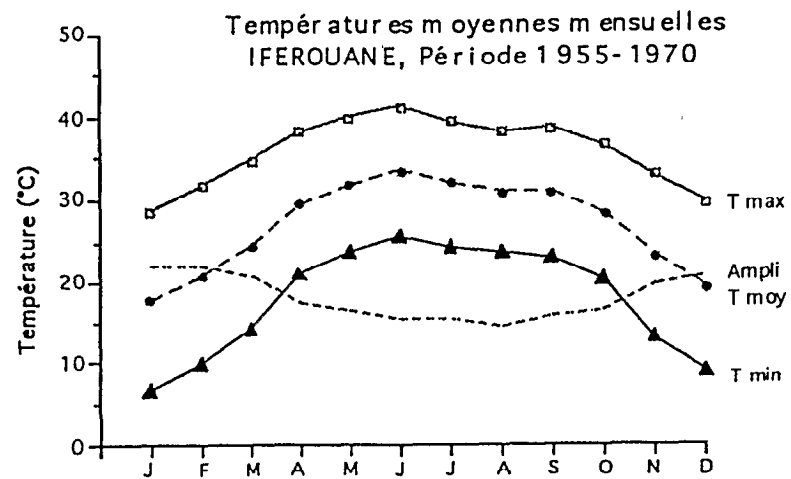
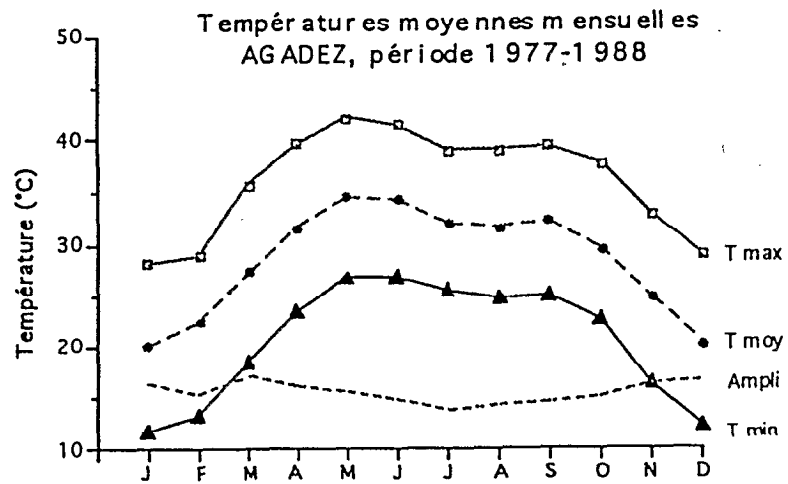
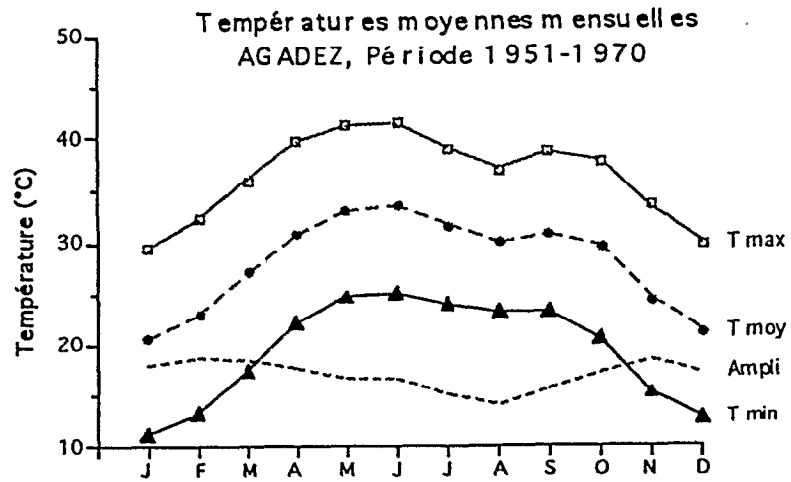
- PUECH C., 1983** - Persistance de la sécheresse au Sahel. Conséquences sur les normes hydrologiques et pluviométriques. C.I.E.H., Série hydrologie, 24 p., 12 fig.
- QUEZEL P., MARTINEZ CI., 1962** - Premiers résultats de l'analyse pollinique de sédiments recueillis au Sahara méridional à l'occasion de la mission Berliet-Tchad. In Hugot édition: Missions Berliet Ténéré-Tchad, documents scientifiques, pp. 313-327.
- QUEZEL P., 1965** - La végétation du Sahara du Tchad à la Mauritanie. Stuttgart, 333 p.
- RAULAIS M., 1957** - La minéralisation de l'Aïr (Terr. du Niger) et ses relations probables avec la tectonique. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 244, n° 7, pp. 913-916.
- RAULAIS M., 1959** - Esquisse géologique sur le massif cristallin de l'Aïr (Niger). Bull. Soc. géol. Fr., 7^e série, t. I, n° 2, pp. 207-223.
- REDELSPERGER J.L., 1992** - Les lignes de grains tropicales. Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France et CNRS), Toulouse, 27 p.
- RIBSTEIN P. PEPIN Y., 1982** - Les bassins versants d'Iférouane; étude hydrologique, campagne 1980; ORSTOM Niamey, 67 p.
- RIBSTEIN P. PEPIN Y., BILLON B., 1983** - Le haut bassin du Téloua; étude hydrologique, campagne 1982; ORSTOM Niamey, 61 p.
- RICHARD C., NGUYEN VAN CU, 1961** - Relation entre la résistivité d'une eau et son taux de minéralisation. L'eau (1), pp. 22-24.
- ROBERT A., HOUZE J.R., 1977** - Structure and Dynamics of a Tropical Squall-Line System. Monthly Weather Review, volume 105, pp. 1540-1566.
- ROCCI G., 1965** - Essai d'interprétation de mesures géochronologiques. La structure de l'ouest africain. Act. Coll. Internat. Géochronologie Nancy I.
- ROCHE M., 1964** - Etudes des nappes d'influo-flux des rivières de la bordure ouest de l'Aïr, campagne 1964. ORSTOM - Niger, 100p.
- ROCHE M., 1970** - Hydrologie de surface. Gauthier-Villars-ORSTOM, Paris. 430p.
- ROCHE M., 1986** - Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Masson, Paris, 288 p.
- RODIER J., 1984-1985** - Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel Cah. ORSTOM, série Hydrologie, vol. XXI, n°2.
- RODIER J., AUVRAY C., 1965** - Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. ORSTOM-CIEH, 30 p.
- RODIER J., RIBSTEIN P., 1988** - Estimation des caractéristique de le crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km²

- ROGNON P., 1975** - Paléoclimatologie et sécheresse actuelle (1969-1974) au Sahel. Revue "Géologues", n° 32, pp. 55-69.
- ROGNON P., 1976 a**- Les oscillations du climat saharien depuis 40 millénaires. Introduction à un vieux débat. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., (2), vol. XVIII, fasc. 2-3, pp. 147-156.
- ROGNON P., 1976 b** - Essai d'interprétation des variations climatiques au Sahara depuis 40.000 ans. Rev. Géogr. Phys. et Géogr. Dyn. (2), vol. XVIII, fasc. 2-3, pp. 251-282.
- ROGNON P., 1980** - Une extension des déserts (Sahara at Moyen-Orient) au cours du Tardiglaciaire (18 000-10 000 ans BP). Rev. Géol. Dyn. et Géogr. Phys., vol. 15, fasc. 4-5, pp. 313-328.
- ROGNON P., 1981** - Les crises climatiques. La Recherche, vol. 12, n° 128, pp. 1354-1364.
- ROSET J.P., 1987** - Paleoclimatic and cultural conditions of neolithic development in the early Holocen of northern Niger (Air and Ténéré) in "Prehistiry of Arid North Africa" SMUP, Dallas.
- ROUSSIN-BARIAC M., 1985** - Etude hydrochimique et isotopique d'une nappe alluviale sous climat semi-aride (cuvette d'Agadez, Niger). Thèse Université Paris-Sud, 218 p.
- ROZANSKI K.L., ARAGUAS-ARAGUAS L., GONFIANTINI R., 1992** - Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate, Science vol. 258, pp. 981-985.
- ROZANSKI K.L., ARAGUAS-ARAGUAS L., GONFIANTINI R., 1993** - Isotopic patterns in modern global precipitation , in AGU, 1-37, Monograph 78 " Climate Change in Continental Isotopic Records ".
- ROZANSKI K.L., ARAGUAS-ARAGUAS L., GONFIANTINI R., 1994** - Isotopic patterns of precipitation in the East African region. In "The Limnology, Climatology and Paleoclimatology of the East African Lakes" (in press).
- SARDOUK Y., 1982** - Les bassins versants de Timia et Tabelot; étude hydrologique, campagne 1980; rapport ORSTOM, Niamey 99 p.
- SAVIN S.M., 1967** - Oxygen and hydrogen isotope ratios in sedimentary rocks and minerals. Ph. D. Thesis, Calif. Inst. Technol. Pasadena; 220pp.
- SERVANT M., 1974** - Les variations climatiques des régions intertropicales du continent africain depuis la fin du Pléistocène. Société Hydrotechnique de France, XIII^e journées de l'Hydraulique, Paris, Question 1, rapport 8, 10 p.
- SHOTTERER U., WILDBERGER A., SIEGENTHALER U., NABHOLZ W., OESCHGER H., 1979**- Isotope study in the Alpine karst region of Rawil Switzerland, Isotope hydrology 1978 (Proc. Symp. Neuherberg, 1978) I.A.E.A., VIENNA 351.
- SIGG L., STUMM W., BEHRA Ph., 1994** - Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Masson, Paris, 391 p.

- SISTERON D.L., LIAW Y.P., 1990** - Evaluation of lightning and corona discharge on thunderstorm air and precipitation chemistry. *Jour. of atmospheric chemistry*, 10, pp 83-96.
- SKLASH M. G., FARVOLDEN R. N., 1979** - The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, 43 : 45-65
- SKLASH M. G., FARVOLDEN R.N., FRITZ P., 1976-** A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen 18 as a natural tracer. *Can.J. Earth Sci.*, 13, 271-283.
- SKLASH M. G., STEWART M. K., PEARCE A. J., 1986** - Storm runoff generation in humid headwater catchments. 2 . A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resour. Res.*,22,8 : 1273-1282
- SKLASH M.G., FARVOLDEN R.N., 1982** - The use of environmental isotopes in the study of high-runoff episodes in streams. In : E.C. Perry, Jr. and C.W. Montgomery (editors), *Isotope studies of hydrologic processes*.N. Illinois Univ. press, dekalb, Ill., pp. 65-73;
- STEWART M. K., 1975** - Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops. Applications to atmospheric processes and evaporation of lakes. *J. Geophys. Res.* 9, vol 80, 1133-1146.
- SUMMER P., FRICKE W., 1989** - Atmospheric decay distances and times for sulfur and nitrogen oxides estimated from air and precipitation monitoring in eastern Canada. *Tellus*, 41 B, pp. 186-195.
- TARDY Y., 1981** - Silice, silicates magnésiens, silicates sodiques et géochimie des paysages arides. *Bull. Soc. géol. France*, 7^e sér., t. XXIII, n° 4, pp. 325-334.
- TAUPIN J.D., 1990** - Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien, et évolution géochimique des solutions des sols (vallée du moyen Niger). Thèse science, Université de Paris Sud.
- TAUPIN J.D., GALLAIRE R., FONTES J-Ch., 1995** - Isotopic study of rainfall in the Sahelian zone (Niger) along two sections, east-west (lake Tchad-Niamey) and north-south (Agadez-Niamey). In *Application of Tracers in Arid Zone Hydrology*; Eilon M. Adar and Christian Leibundgut editors; IAHS Publ. n°232, pp. 285-292.
- TEHET R., GASSE F., DURAND A, SCHROETER P. et FONTES J. Ch., 1990** - Fluctuations climatiques du Tardiglaciaire à l'Actuel au Sahel (Bougoudouma, Niger Méridional). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 311, sér. II, n° 1, pp. 253-258.
- TESTUD J., 1984** - Un orage tropical pas comme les autres. *La Recherche* n° 157, vol. 15,
- TETZLAFF G., PETERS M., 1986** - The atmospheric transport potential for water vapour and dust in the sahel region. *J. Geophys.* 12, pp. 387-398.

- TRICART J., 1963** - Oscillations et modification de caractère de la zone aride en Afrique et en Amérique latine lors des périodes glaciaires des hautes latitudes. Recherches sur la zone aride . Les changements de climat. Actes du colloque de Rome (10/1961), UNESCO, pp. 415-419.
- TURC L., 1954-55** - Le bilan d'eau des sols : Relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agron. 5, pp 491-509 ; 6, pp 5-131
- TURNER J.V., MACPHERSON D.K., STOKES R.A., 1987** - The mechanisms of catchment flow processes using natural variations in Deuterium and Oxygen-18. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam.
- UREY H. C., 1948** - Oxygen Isotope in Nature and in the laboratory. Science, vol. 108, n° 2810, pp. 489-496.
- VALENTIN C., 1985** - Organisations pelliculaire superficielles de quelques sols des régions subdésertiques, (Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau), Agadez, (Niger). Thèse de 3^{ème} cycle, Paris VII - ORSTOM, 231p.
- VALSARDIEU Cl., 1971** - Etude géologique et paléogéographique du bassin de Tim Mersoï, région d'Agadez, Niger. Thèse Sciences Naturelles, Nice, 518 p.
- VISOCKY A. P., 1970** - Estimating the groundwater contribution to storm runoff by the electrical conductance method. Groundwater, 8: 5-10.
- VOGT J., BLACK R., 1963** - Remarques sur la géomorpho de l'Aïr; Bull. BRGM, 1, pp. 1-29.
- VUILLAUME G., 1974** - L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale, variabilité et précision du calcul. Cahier ORSTOM, série hydrologie, vol. XI, n°3: 205-225.
- WALKER J.M. 1972** - Monsoon and the global circulation. Meteor. Mag., 101, pp. 349-355.
- WARD R.C., 1984** - Hypothesis by modelling catchment response, J. Hydrol., 67: 281-305
- WELS C., CORNETT R.J., LAZERTE B.D., 1991** - Hydrograph Separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers. J. of Hydrol., vol 122, n° 1-4, p.253 - 274.
- WOLTER K., 1989** - Modes of tropical circulation, Southern Oscillation, and Sahel rainfall anomalies. J. Climate, 2, pp. 149-172.
- YURTSEVER Y., GAT J.R., 1980** - Atmospheric waters in "Stable isotope hydrology. Deut. and oxygen18 in the water cycle", Techn. reports, series n°210, IAEA, Vienne, pp.103 -142.
- ZOUARI K., ARANYOSSY J.F., MAMOU A., FONTES J.C., 1985** - Etude isotopique et géochimique des mouvements et de l'évolution des solutions de la zone aérée des sols sous climat semi-aride (sud Tunisie) Tech. Doc. IAEA, n° 357, 121.
- ZUPPI G.M., 1981** - Rapport d'avancement sur l'étude du massif de l'Aïr. AT rap.1771, A.I.E.A., Vienne, 28p.

ANNEXES



ANNEXE 2-A.I,1 Températures à Agadez et Iférouane

1984

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)				24,4	30,0	27,6	27,1	27,1	26,5	23,6	18,9	13,7
T maxi (°C)				40,1	43,1	41,3	39,5	40,5	38,5	37,5	33,2	26,9
T moy (°C)				32,2	36,6	34,5	33,3	33,8	32,5	30,6	26,1	20,3
U mini (%)				14,4	20,8	26,6	28,2	19,0	33,4	22,5	31,7	24,7
U maxi (%)				20,7	28,6	34,0	45,5	33,2	42,5	31,0	42,7	36,4
U moy (%)				17,6	24,7	30,3	36,9	26,1	37,2	26,8	37,2	30,6
Piche 7h (mm)				241	263	248	220	227	216	215	172	156
Piche 18h				336	372	338	291	314	312	327	278	228
Total Piche				577	635	586	510	541	528	542	450	384

1985

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)	15,9	14,2	22,4	21,3	28,1	27,4	26,4	25,3	25,7	22,3	17,5	13,8
T maxi (°C)	29,7	29,2	35,8	36,1	41,9	41,6	38,6	38,3	39,2	35,9	33,3	27,6
T moy (°C)	22,8	21,7	29,1	28,7	35,0	34,5	32,5	31,8	32,5	29,1	25,4	20,7
U mini (%)	33,2	43,4	37,8	20,5	24,9	20,6	34,1	33,2	30,8	25,1	50,9	25,8
U maxi (%)	41,5	54,0	44,2	26,0	34,0	31,8	56,5	60,2	43,7	35,3	63,0	37,9
U moy (%)	37,3	48,7	41,0	23,2	29,4	26,2	43,8	46,7	37,3	30,2	56,9	31,9
Piche 7h (mm)	180	180	240	239	246	249	246	177	219	228	183	172
Piche 18h	249	276	344	356	344	332	306	245	307	340	283	263
Total Piche	430	456	584	595	590	581	552	422	526	568	466	435

1986

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)	11,8	16,4	21,2	27,6	26,6	28,0	26,1	25,7	25,1	22,7	18,7	11,7
T maxi (°C)	27,8	32,9	36,1	41,6	40,8	41,4	38,1	38,7	38,3	36,8	32,7	27,0
T moy (°C)	19,8	24,7	28,6	34,6	33,7	34,7	32,1	32,2	31,7	29,8	25,7	19,3
U mini (%)	21,2	21,2	27,4	20,8	23,2	19,7	43,8	32,0	43,9	34,8	62,7	78,9
U maxi (%)	35,9	30,4	33,3	29,3	29,0	36,5	62,6	60,3	57,5	46,8	69,1	80,6
U moy (%)	28,6	25,8	30,4	25,0	26,1	28,1	53,2	46,2	50,7	40,8	65,9	79,8
Piche 7h (mm)	161	190	246	263	266	242	186	210	206	271	226	164
Piche 18h	230	252	312	365	342	288	263	275	302	397	328	223
Total Piche	391	442	558	628	608	530	449	485	508	668	554	387

ANNEXE 2-A.II,1 Données climatologiques moyennes mensuelles à AZEL

1987

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)	13,1	16,4	20,7	21,5	26,7	27,3	27,8	26,8	26,5	23,1	18,0	15,3
T maxi (°C)	29,8	32,1	35,3	37,1	42,1	41,2	41,5	39,7	39,8	36,9	33,4	29,5
T moy (°C)	21,5	24,3	28,0	29,3	34,4	34,2	34,7	33,3	33,1	30,0	25,7	22,4
U mini (%)	50,9	68,9	75,5	87,5	64,1	45,5	73,9	34,2	33,1	50,1	60,7	31,3
U maxi (%)	61,1	77,7	84,2	90,5	69,0	56,9	82,6	61,0	49,1	37,3	70,8	48,8
U moy (%)	56,0	73,3	79,8	89	66,5	51,2	78,2	47,6	41,1	43,7	65,7	40,1
Piche 7h (mm)	132	137	194	184	189	196	201	174	187	217	151	156
Piche 18h	199	177	252	279	291	255	271	234	273	319	220	233
Total Piche	331	314	446	463	480	451	472	408	460	536	371	389

1988

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)	14,1	15,9	20,3	26,3	26,7	28,7	26,0	25,3	26,4	21,7	17,7	13,0
T maxi (°C)	27,7	30,8	35,6	40,6	41,9	41,3	38,4	36,9	39,3	35,9	32,6	27,4
T moy (°C)	20,9	23,4	28,0	33,4	34,3	35,0	32,2	31,1	32,9	28,8	25,2	20,2
U mini (%)	51,2	42,0	61,1	37,5	59,9	58,1	57,2	55,3	39,3	35,0	62,0	43,2
U maxi (%)	61,0	54,9	67,6	41,9	68,9	60,0	75,5	78,9	59,1	49,7	70,0	51,1
U moy (%)	56,1	48,5	64,4	39,7	64,4	59,0	66,3	67,1	49,2	42,4	66,0	47,1
Piche 7h (mm)	151	141	187	233	281	282	212	193	244	220	213	281
Piche 18h	218	185	273	320	390	389	308	297	364	373	322	476
Total Piche	369	326	460	553	671	671	520	490	608	593	535	476

AZEL - Données climatologiques moyennes mensuelles (suite)

1989

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)	10,9	13,2	18,4	23,2	25,3	28,5	26,0	24,2	25,5	23,1	17,8	14,5
T maxi (°C)	25,7	27,1	33,8	39,6	40,9	42,0	39,4	37,0	39,8	36,7	32,6	29,2
T moy (°C)	18,3	20,2	26,1	31,4	33,1	35,2	32,7	30,6	32,7	29,9	25,2	21,9
U mini (%)	53,6	75,8	85,2	47,4	69,7	52,6	39,3	47,9	28,5	51,0	76,2	49,3
U maxi (%)	58,3	81,0	90,0	58,4	78,1	64,4	65,1	69,5	49,0	63,3	81,1	53,0
U moy (%)	55,9	78,4	87,6	52,9	73,9	58,5	52,2	58,7	38,7	57,1	78,7	51,2
Piche 7h (mm)	168	170	253	275	263	310	267	153	210	225	167	162
Piche 18h	269	250	386	352	392	410	326	226	314	334	272	242
Total Piche	437	420	639	627	655	720	593	379	524	559	439	404

1990

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T mini (°C)	16,4	13,8	17,1	26,4	29,3	27,9	25,9	25,4				
T maxi (°C)	29,6	28,7	32,2	41,2	42,1	41,9	38,9	39,0				
T moy (°C)	23,0	21,2	24,7	33,8	35,7	34,9	32,4	32,2				
U mini (%)	47,7	70,8	86,0	69,6	61,4	58,8	41,6	37,7				
U maxi (%)	49,1	75,8	87,9	75,3	69,4	69,7	64,7	63,4				
U moy (%)	48,4	73,3	86,9	72,4	65,4	64,3	53,2	50,5				
Piche 7h (mm)	186	151	202	265	247	250	183	166				
Piche 18h	262	228	331	369	366	350	260	258				
Total Piche	448	379	533	634	613	600	443	424				

AZEL - Données climatologiques moyennes mensuelles (suite)

POSTES AU NORD DE L'AÏR (Totalisateurs annuels)

IWELEN: 19°47' N, 8°25' E. (1981-1990) NORD-BOUS: 21°10' N, 9°15' E (1983-1989)

TEMET: 19°58' N, 8°40' E (1981-1990) SITE ATERIEN: 21°40' N, 9°11' E (1983-1989)

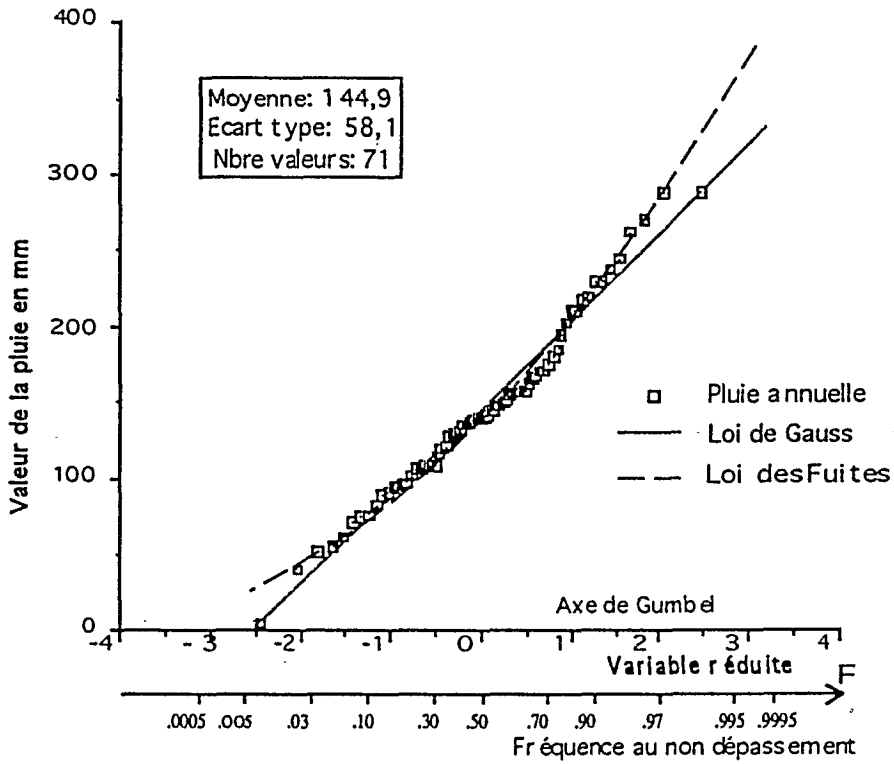
ADRAR BOUS: 20° 21' N, 8°58' E (1981-1990)

POSTES DANS L'AÏR

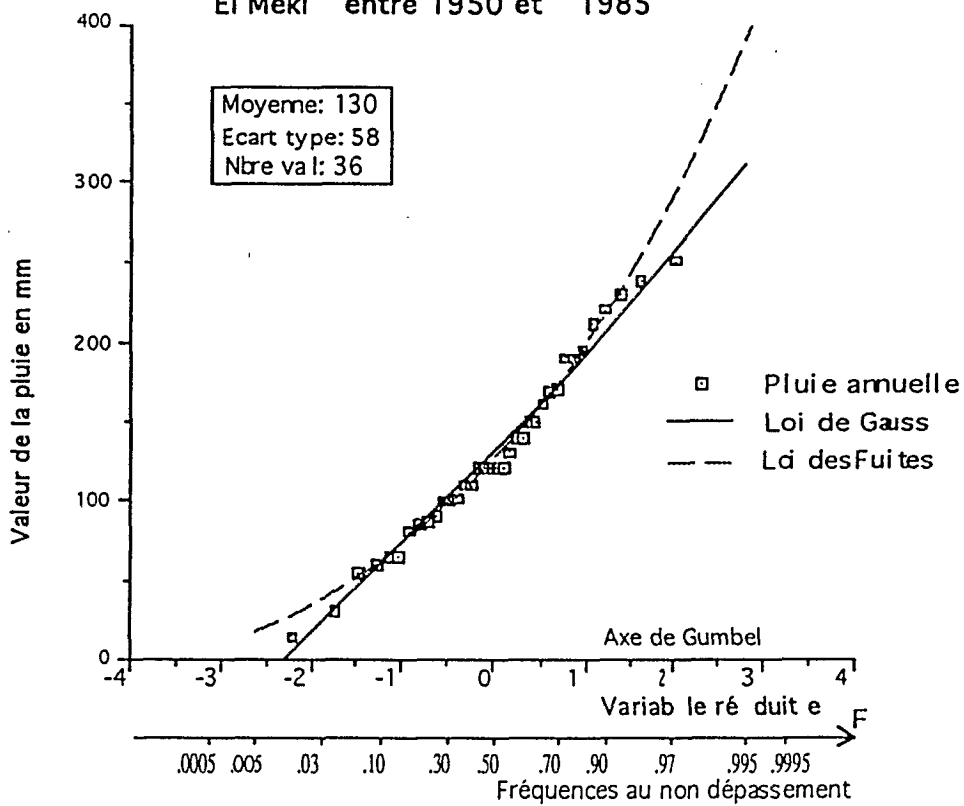
ABARDOK:	17°31' N, 8°39' E, 830 m (observations journalières depuis 1978)
ADDEKA:	17°24' N, 8°33' E, (1959-60, totalisateur mensuel)
AGADEZ:	16°59' N, 7°59' E, 515 m (observations journalières depuis 1921)
AGUELLAL:	18°48' N, 8°06' E, (1959-60, puis 76-78, tot. mens)
AOUERAS:	17°38' N, 8°25' E, 810 m (observations journalières depuis 1976)
ASSODE:	18°28' N, 8°36' E, (1959-60, puis 76-78, tot. mens)
AZEL:	17°03' N, 8°03' E, 526 m (observations journalières depuis 1975)
BEDEI:	17°32' N, 8°23' E, (1959-60, puis 76-90, tot. mens)
DABAGA:	17°19' N, 8°08' E, 650 m (observations journalières depuis 1976)
EL MEKI:	17°44' N, 8°17' E, 680 m (observations journalières de 1950 à 1985)
FAODET:	18°47' N, 8°32' E, (1959-60, puis 76-78, tot. mens)
GOUGARAM:	18°27' N, 7°48' E (1959-60, puis 76-78, tot. mens)
GUERIP-GUERIP:	18°05' N, 8°41' E, (1959-60, puis 76-78, tot. mens)
IFEROUANE:	19°03' N, 8°25' E, 653 m (observations journalières depuis 1940)
IN DOUDOU:	17°08' N, 8°05' E, 568 m (observations journalières depuis 1980)
IN KAKANE:	17°50' N, 7°50' E (1959-60, totalisateur mensuel)
OUAJOUR:	17°22' N, 8°27' E, (1959-60, puis 76-90, tot. mens)
OUIDINENE:	17°28' N, 8°09' E, (1959-60, totalisateur mensuel)
RAZEL MAMOU:	17°14' N, 8°06' E, (obs journ. en 59-60 et depuis 1975)
SUD-BAGZAN:	17°34' N, 8°47' E, (1959-60, totalisateur mensuel)
TABELOT:	17°35' N, 8°55' E, 900 m (observations journalières depuis 1968)
TAROUADJI:	17°07' N, 8°31' E, (1959-60, totalisateur mensuel)
TCHEFIRA:	17°22' N, 8°20' E, (obs journ. en 59-60 et depuis 1976)
TESSOUMA:	17°28' N, 8°39' E, (1959-60, totalisateur mensuel)
TIMIA:	18°07' N, 8°46' E, 1100 m (observations journalières de 1976 à 1978)
TINTARODA:	18°59' N, 8°30' E, (1959-60, puis 76-78, tot. mens)
TOURAYET:	16°59' N, 8°41' E, (1959-60, totalisateur mensuel)
T-TEBEZGUIN:	17°06' N, 7°50' E, (1977-1979, obs. journalières)

ANNEXE 2-A.III,1 POSTES PLUVIOMETRIQUES DE LA REGION AÏR
Situation, forme et période d'exploitation
(hors étude de bassin versant)

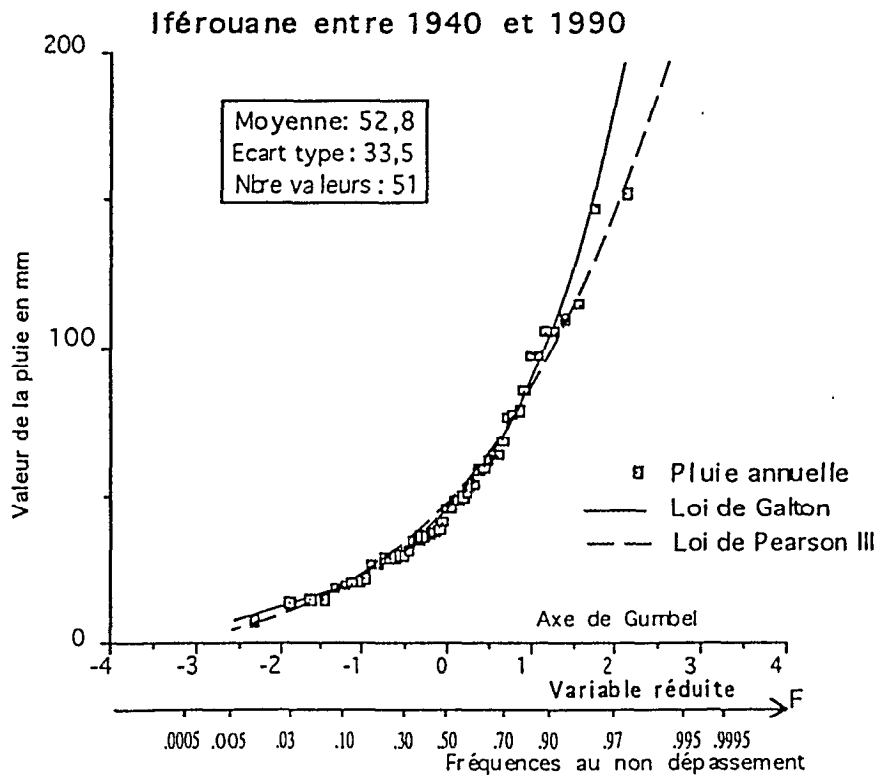
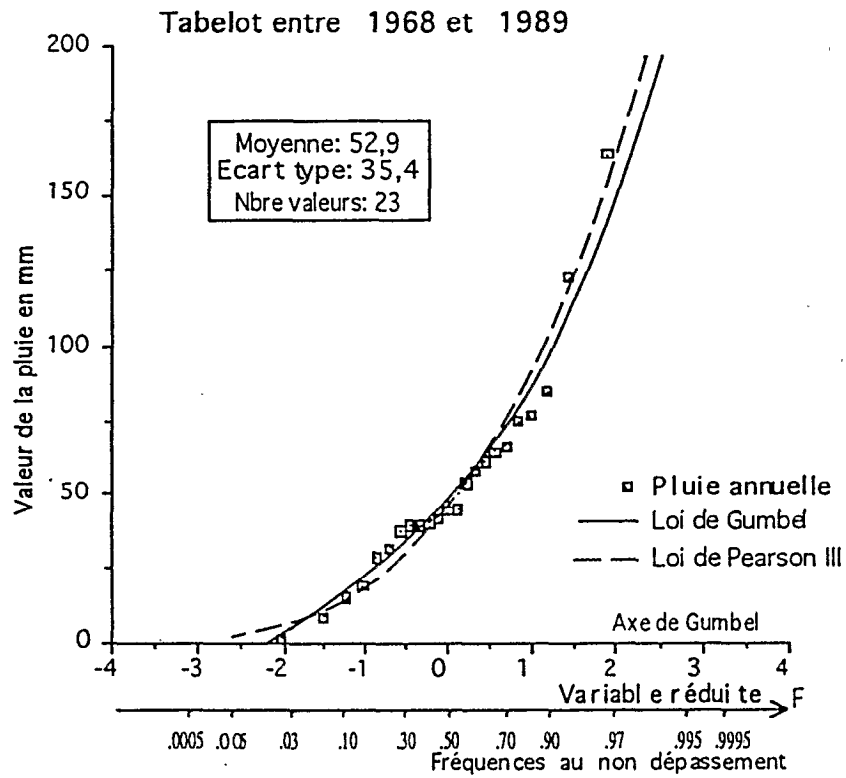
Agadez entre 1922 et 1993



El Méki entre 1950 et 1985

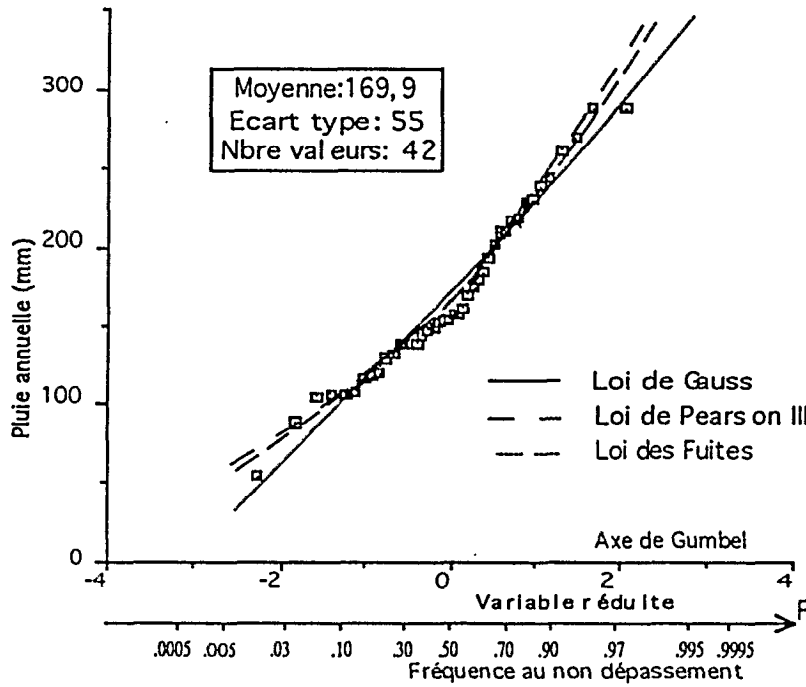


ANNEXE 2-A.III,2 Distributions statistiques des pluies annuelles aux postes d'Agadez et El Méki

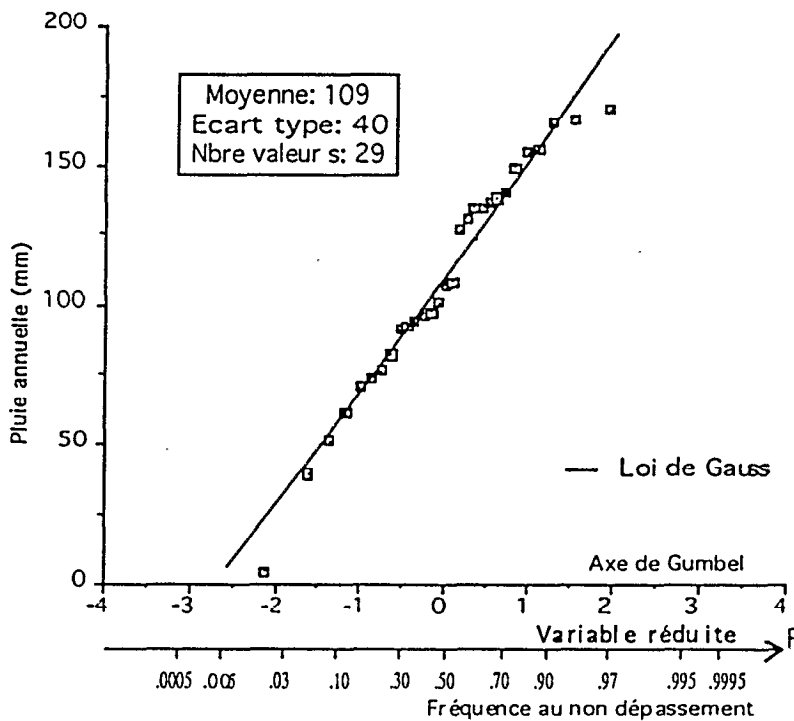


ANNEXE 2-A.III,3 Distributions statistiques des pluies annuelles aux postes de Tabelot et Iférouane

Agadez séquence excédentaire 1922-1964

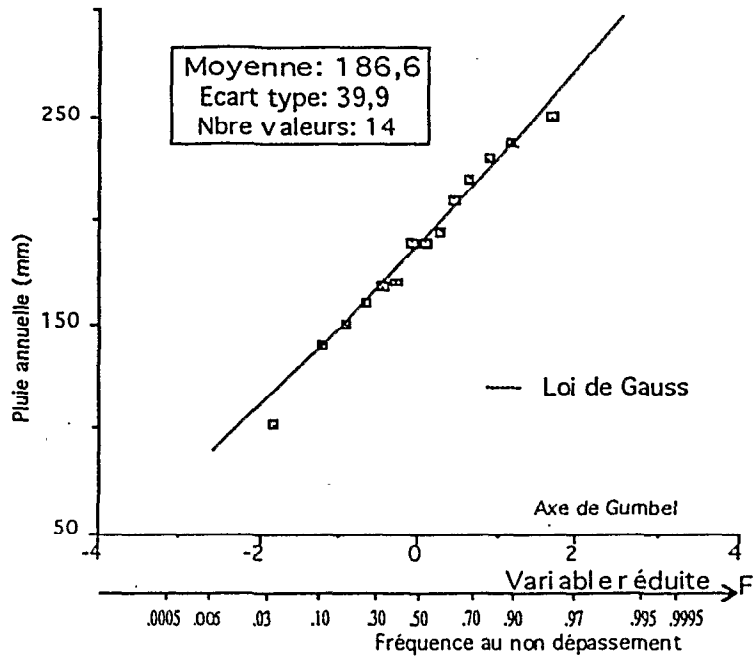


Agadez séquence déficitaire 1965-1993

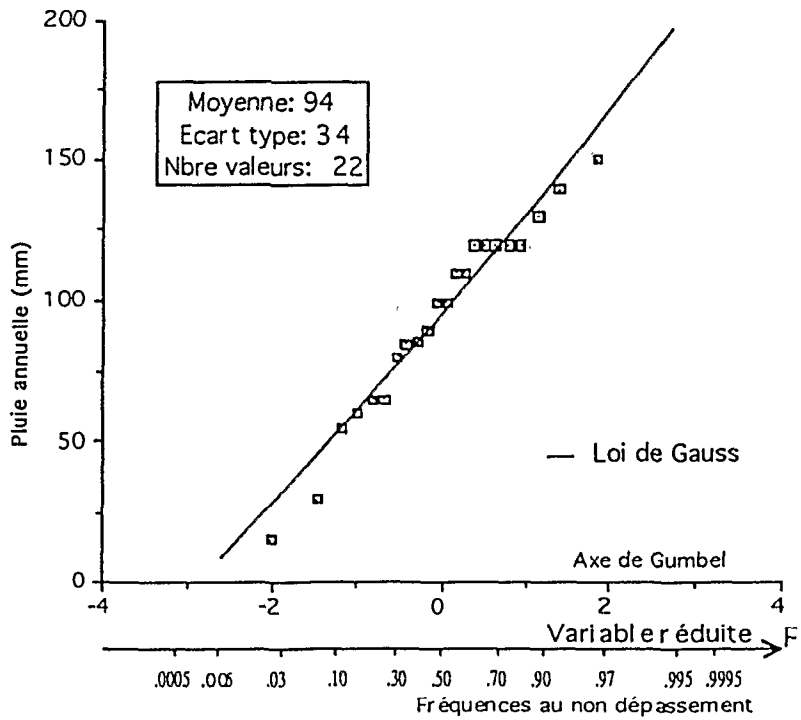


ANNEXE 2-A.III,4 Distributions statistiques des pluies annuelles, séquences "sèche et humide" d'Agadez

El Méki séquence excédentaire 1950-1963

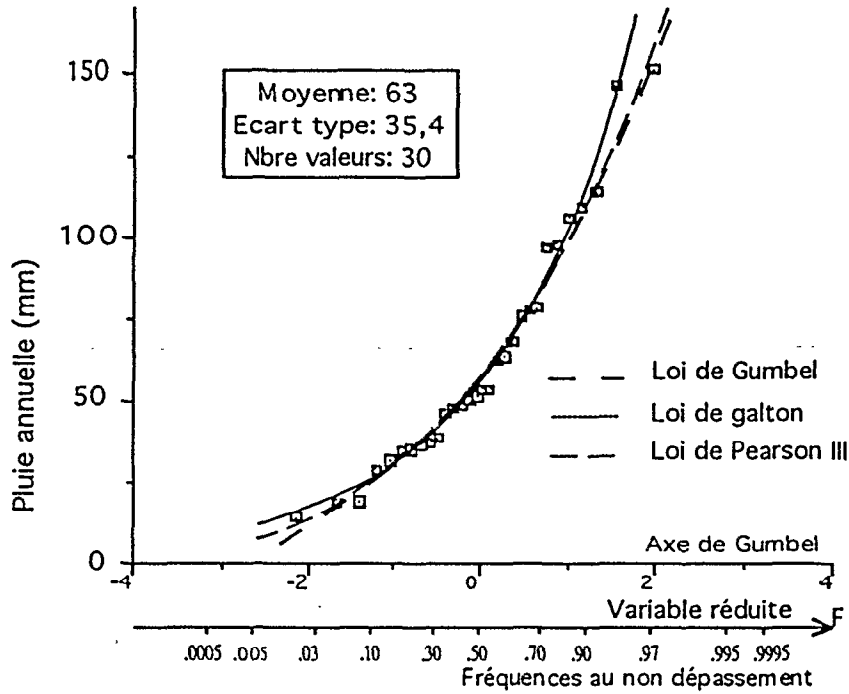


El Méki séquence déficitaire 1964-1985

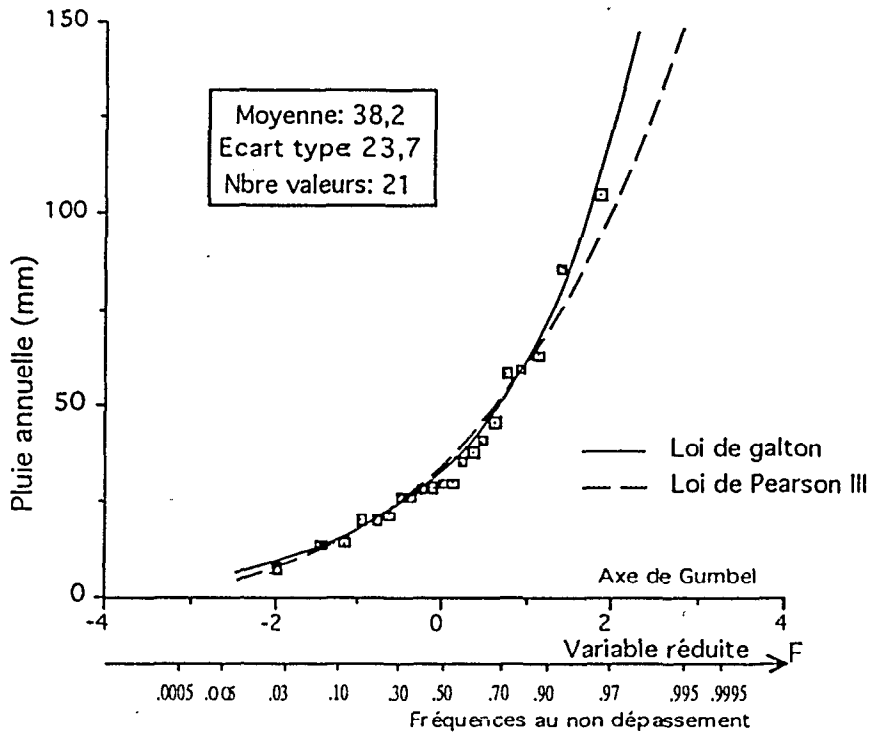


ANNEXE 2-A.III,5 Distributions statistiques des pluies annuelles, séquences "sèche et humide" d'El Méki

Iférouane séquence excédentaire 1940-1969



Iférouane séquence déficitaire 1970-1990



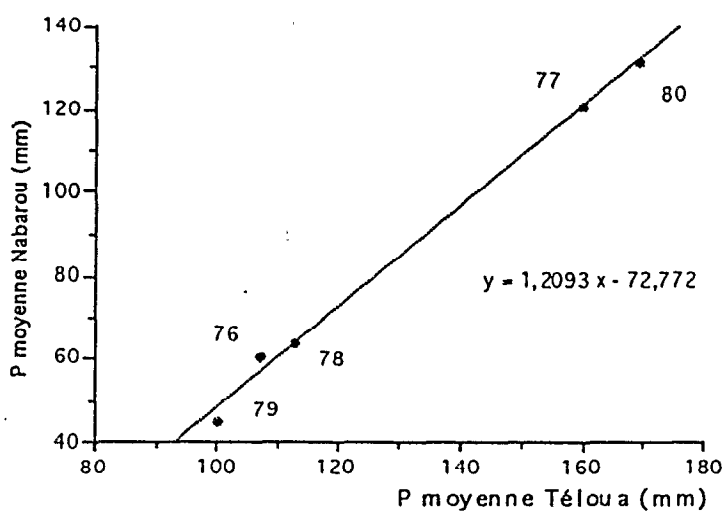
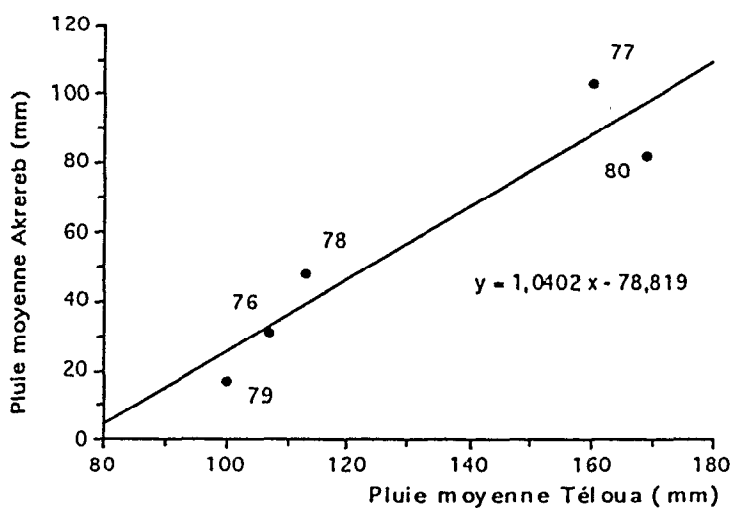
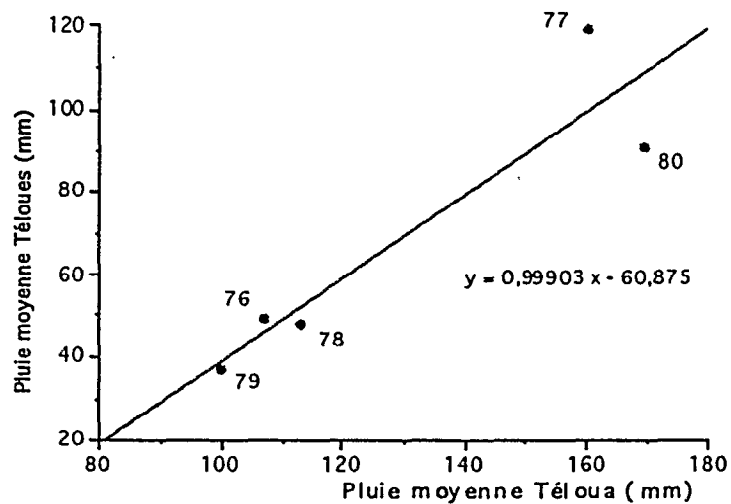
ANNEXE 2-A.III,6 Distributions statistiques des pluies annuelles, séquences "sèche et humide" d'Iférouane

POSTES / FREQUENCES	P 1	P 20	P 22	P 24	P 26	P 28	P 29	P 32	P 33	P 34
DISTRIBUTIONS OPTIMALES	<u>Fuites</u>	<u>Gumbel</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gauss</u>	<u>P III</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gauss</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gauss</u>	<u>Gauss</u>
Suivant tests et ajust. graph.	<u>Gauss</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gumbel</u>	<u>Fuites</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gumbel</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gauss</u>	<u>Fuites</u>	<u>Gumbel</u>
Moyenne	102,2	137,4	118	76,1	108,5	88,2	77,6	110	118	130
Ecart-type	52,7	81,3	59,3	32,1	62	53,8	47,6	59,8	53,7	54
Taille échantillon	15	13	14	14	15	13	12	14	13	14
f= 0,05 (vingtenale sèche)	23	23	33	25	26	13	3	22,5	33	44
f= 0,10 (décennale sèche)	35	41	46	37	37	23	19	35	52	63
f=0,50 (un an sur deux)	94	124	110	76	96	79	78	100	118	130
f=0,90 (décennale humide)	181	254	199	116	198	166	136	197	184	197
f=0,95 (vingtenale humide)	210	303	229	127	236	197	152	230	203	216

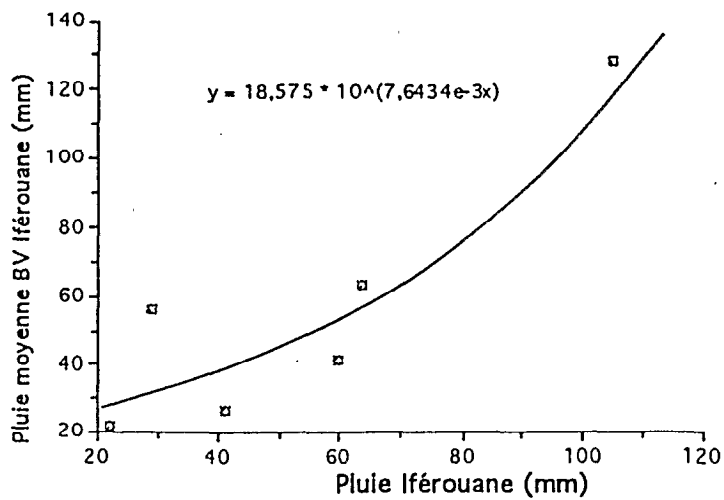
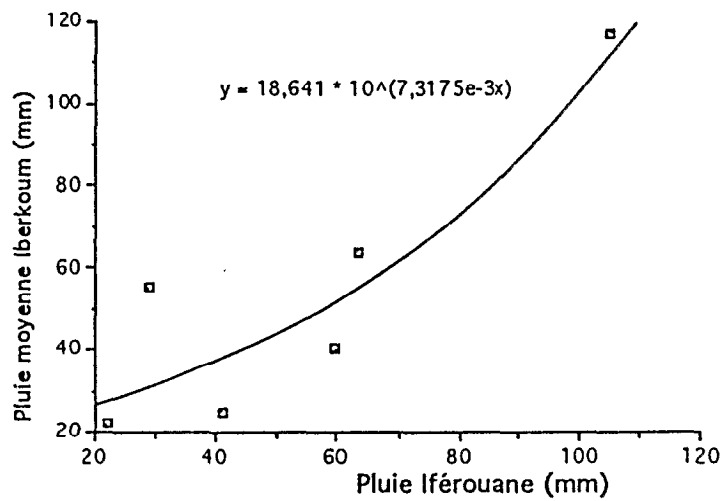
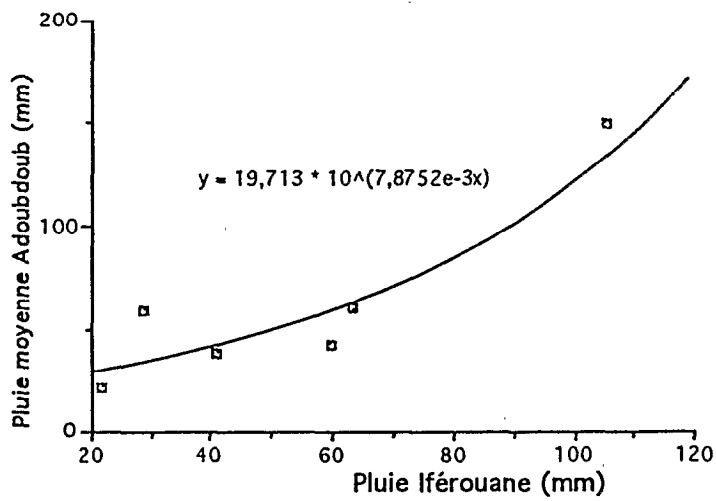
Bassin du Téloua: Pluies annuelles

Postes Pluie (mm)	P1 Azal	P20 Razel	P22 Dabaga	P24 Tchelira	P26 Route Tabelot	P28 Rte Tab lim bas	P29 Aghaoua	P32 Rte Aoudéras	P33 Rte Aou lim bas	P34 Aoudéras
1959		131						218		
1976	78,1			77,7	75	81	80	76,8	77,7	
1977	94		104		145					232
1978	167		136,2	87,9	87,9				126,3	126,3
1979	69,7	68,3	86	96,5	53,2	106,9	145	154,4	130,3	119,8
1980	108,6	281,6	190,3	145,2	226,5	140,6		224,3	172,9	162,6
1981	100,8	163,3	183,8	76,4	118,2	50,6	120	133,4	212,7	139,2
1982	130,7	291	129,5	64,6	227,7	178,8	130	114,6	130,2	112,6
1983	61,7	68,9	40,6	28,9	127	74,2	71,8	98,1	108,8	122,5
1984	5,2	7	30,5	15	15	3	9,9	12,8	6,9	36,6
1985	63,1	159	131,7	89,5	37,7	70,6	47,2	54,3	56,4	99,5
1986	106,1	114,1	143,3	64,7	85	152,7	104,6	104	152,2	159,9
1987	34,6	44,2	41,5	52,7	82,5	20,5	26,6	140,1	75,3	53,6
1988	192,7	203,3	245,8	120,6	178	164	132	202	181	179,4
1989	128,1	122,6	95,3	80,5	119,6	51,2	63	59,6	99,7	208,2
1990	196,3	132,5	90	65,3	52,4	53,3	65	141,8		67,4

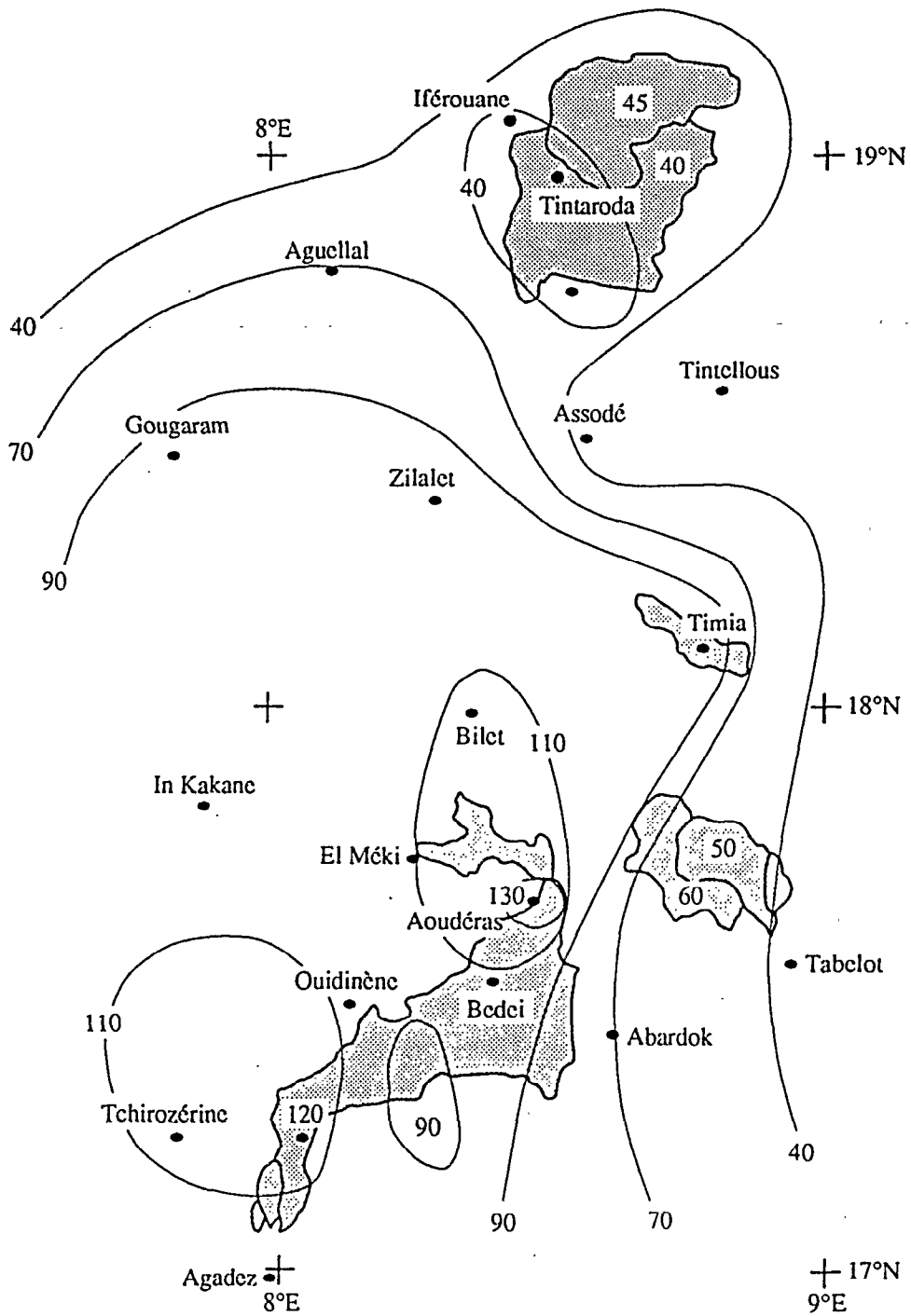
ANNEXE 2-A.III,7 Distributions statistiques des pluies annuelles du bassin du Téloua, Période 1976-1990 (mm)



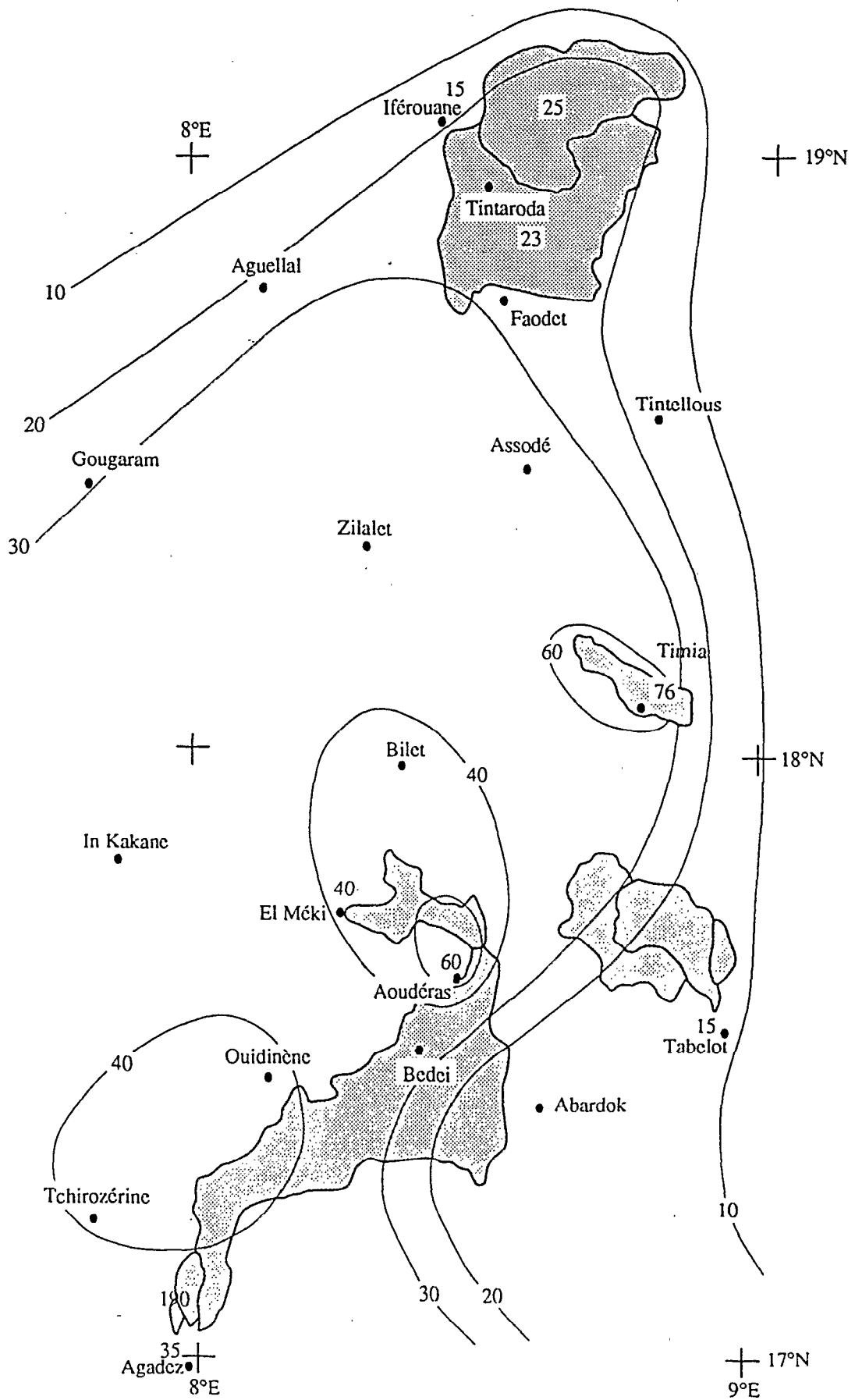
ANNEXE 2-A.III,8 Relations pluies moyennes des BV de Tabelot, pluie moyenne du BV du Téloua



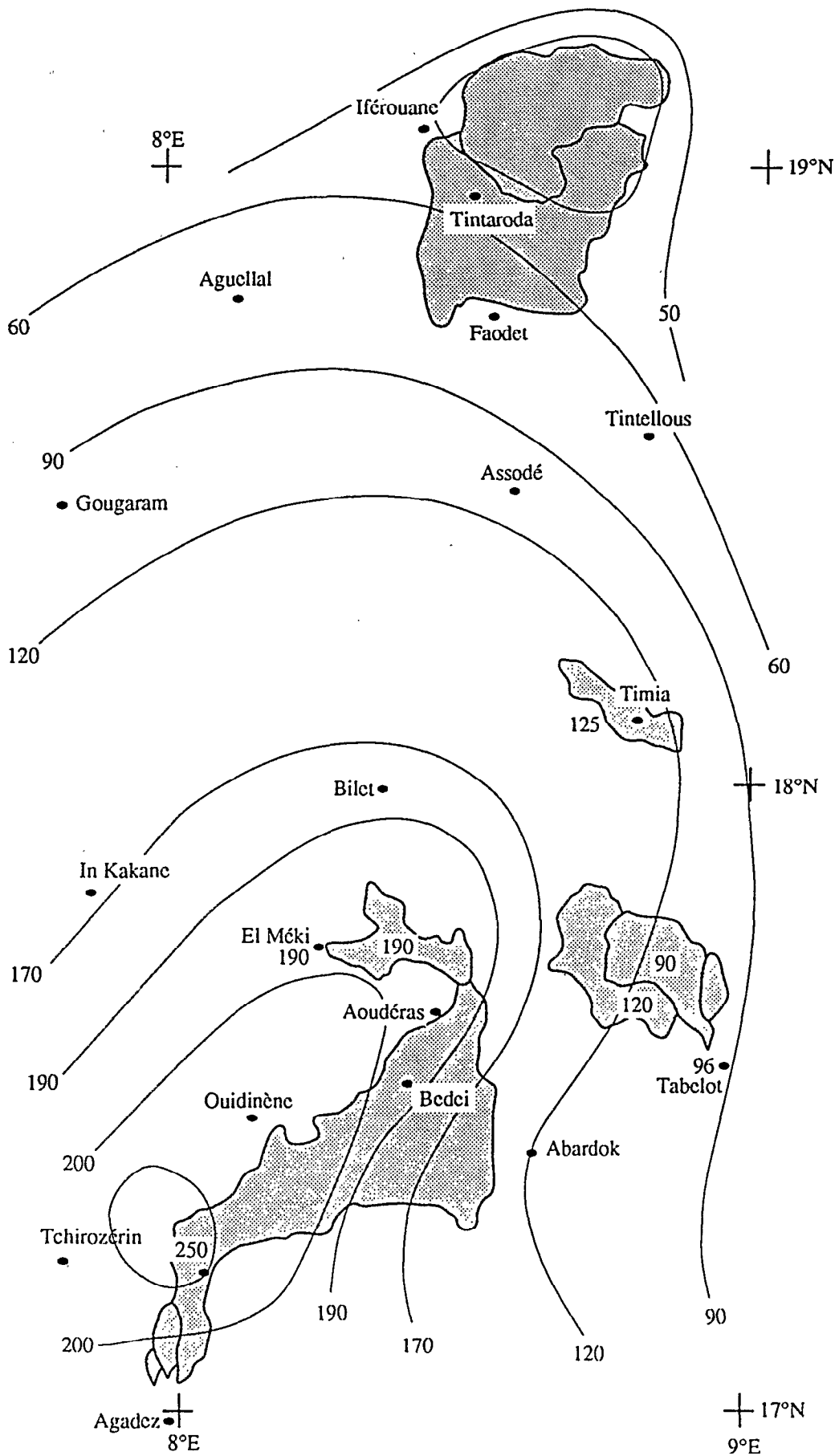
ANNEXE 2-A.III,9 Relations pluies moyennes des BV d'Iférouane, pluie moyenne du poste d'Iférouane



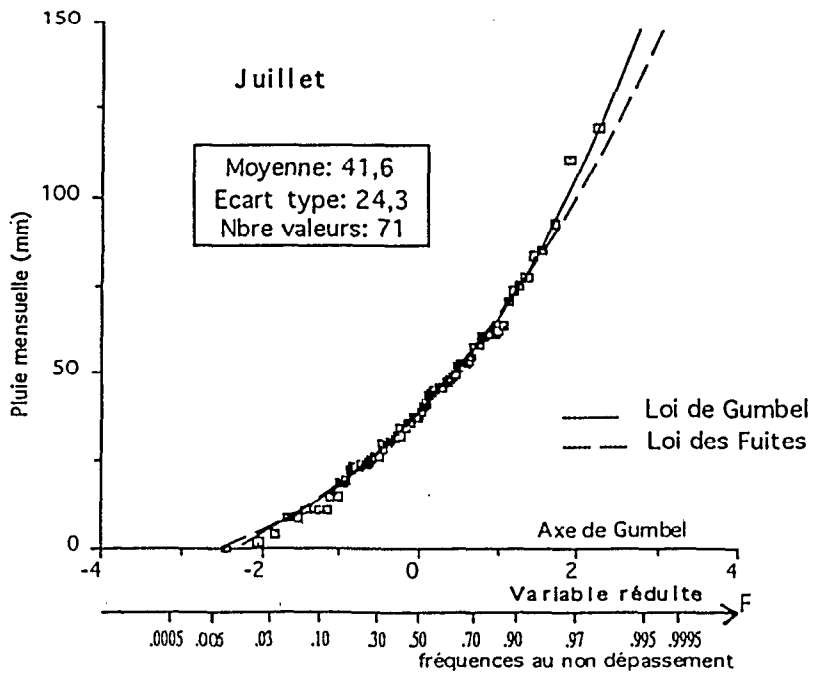
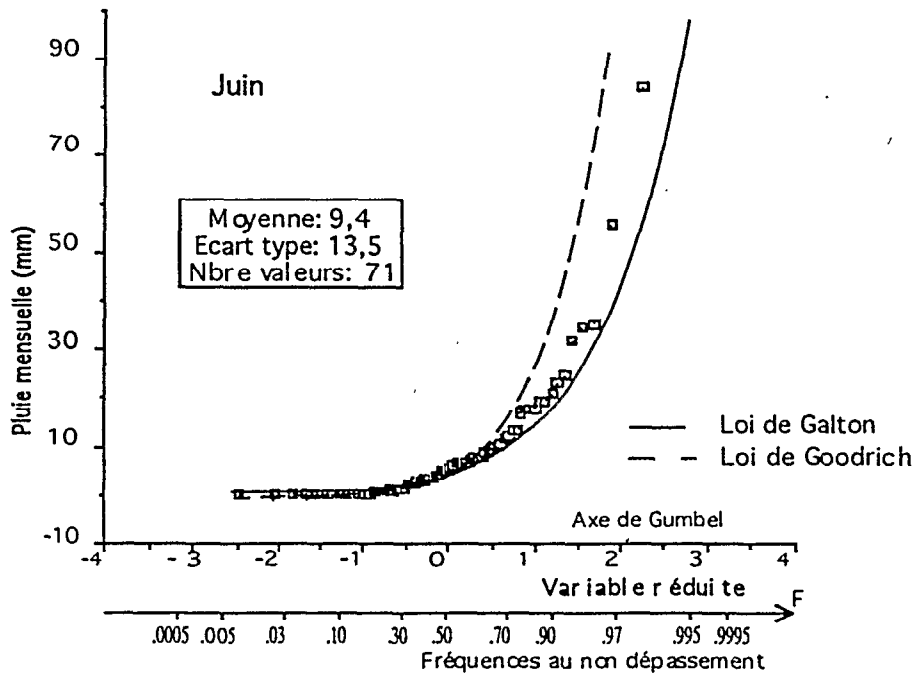
ANNEXE 2-A.III,10 Isohyètes annuelles médianes de l'Air



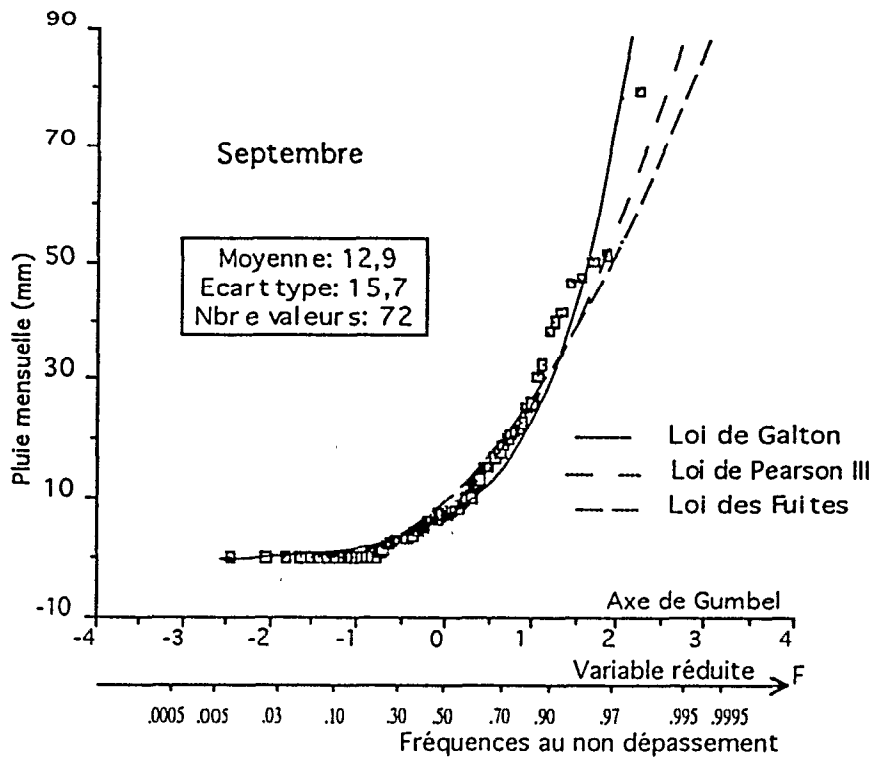
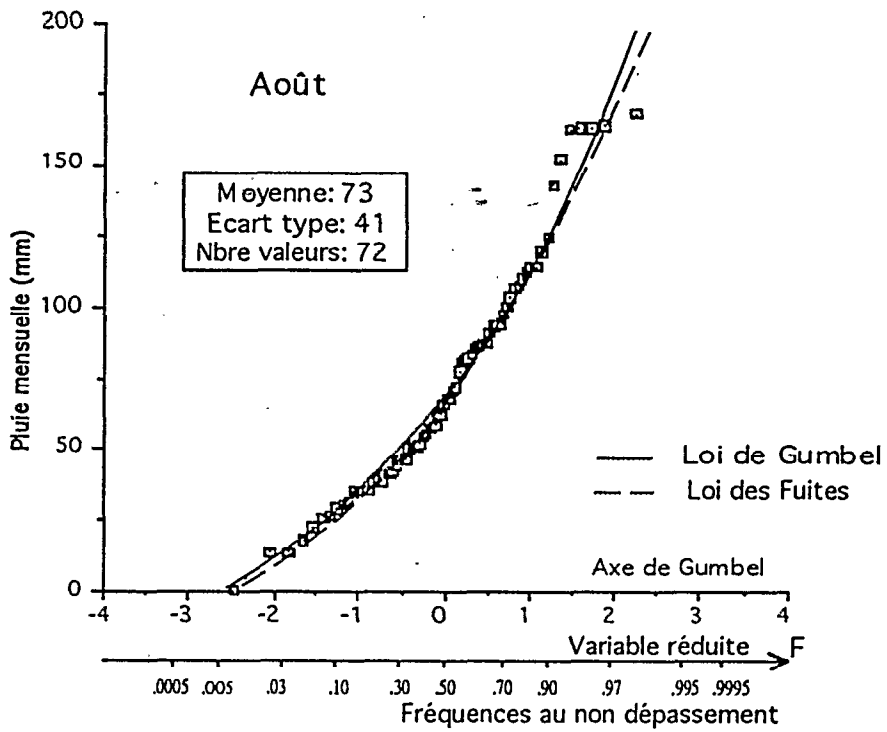
ANNEXE 2-A.III,11 Isohyètes décennales sèches de l'Air



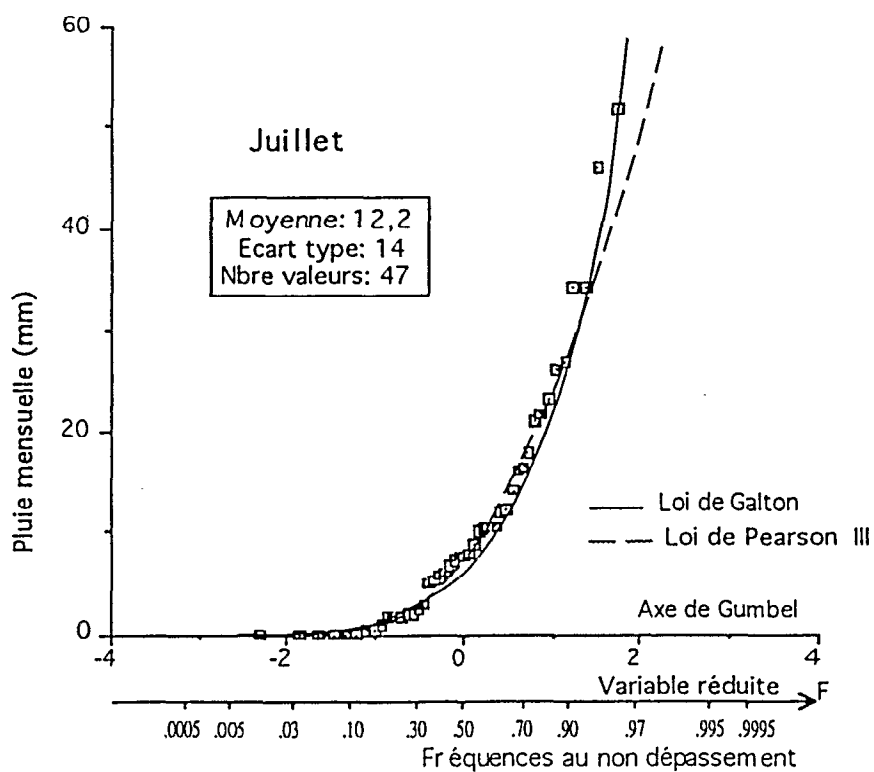
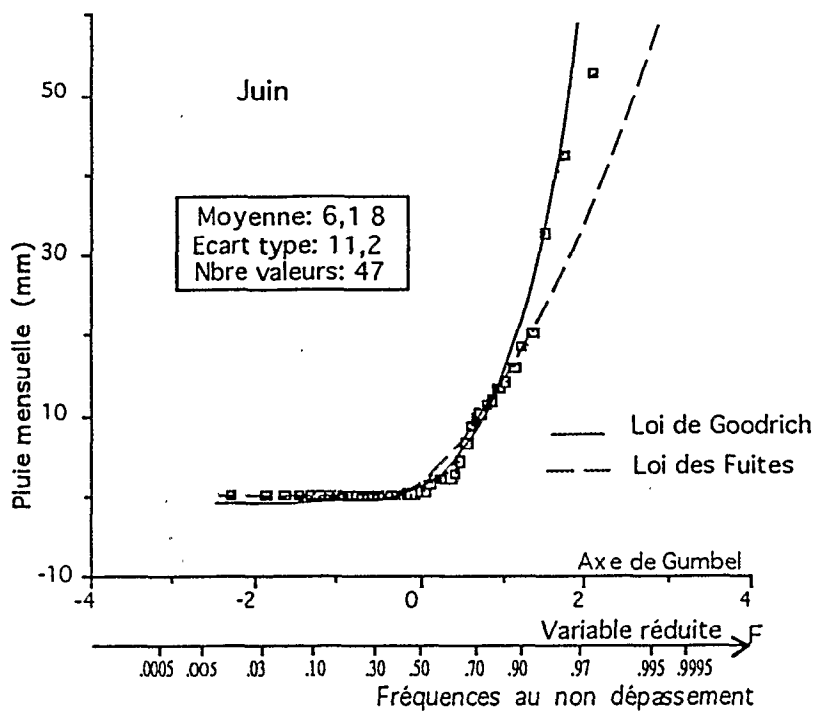
ANNEXE 2-A.III,12 Isohyètes décennales humides de l'Air



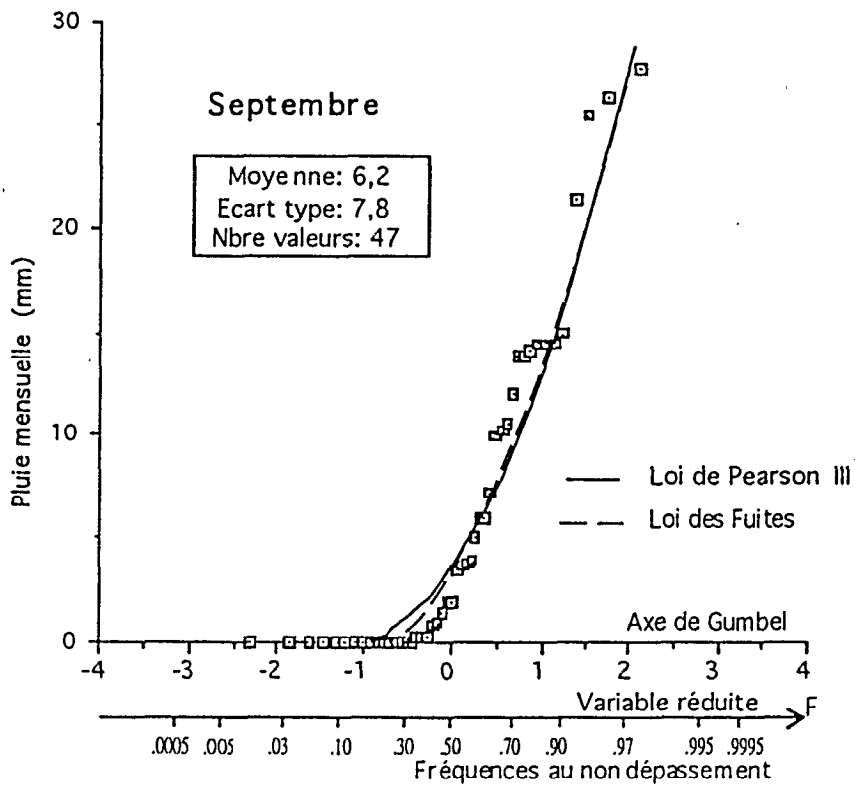
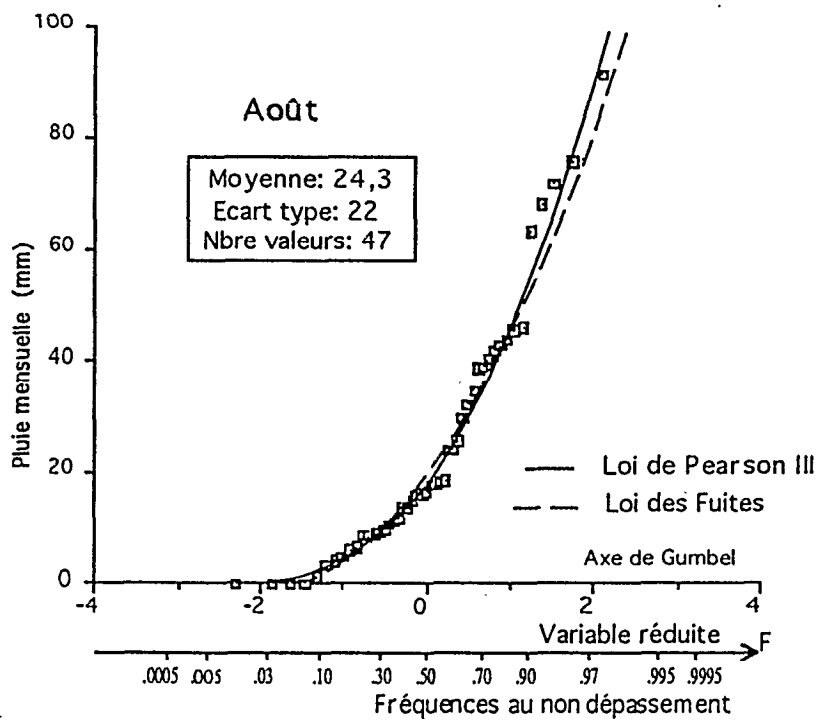
ANNEXE 2-A.III,13 Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Agadez



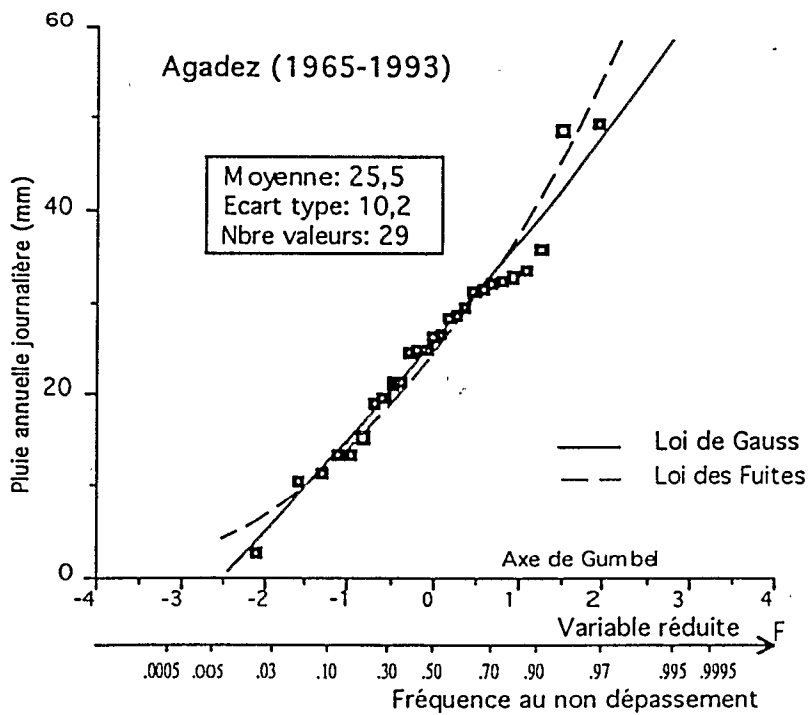
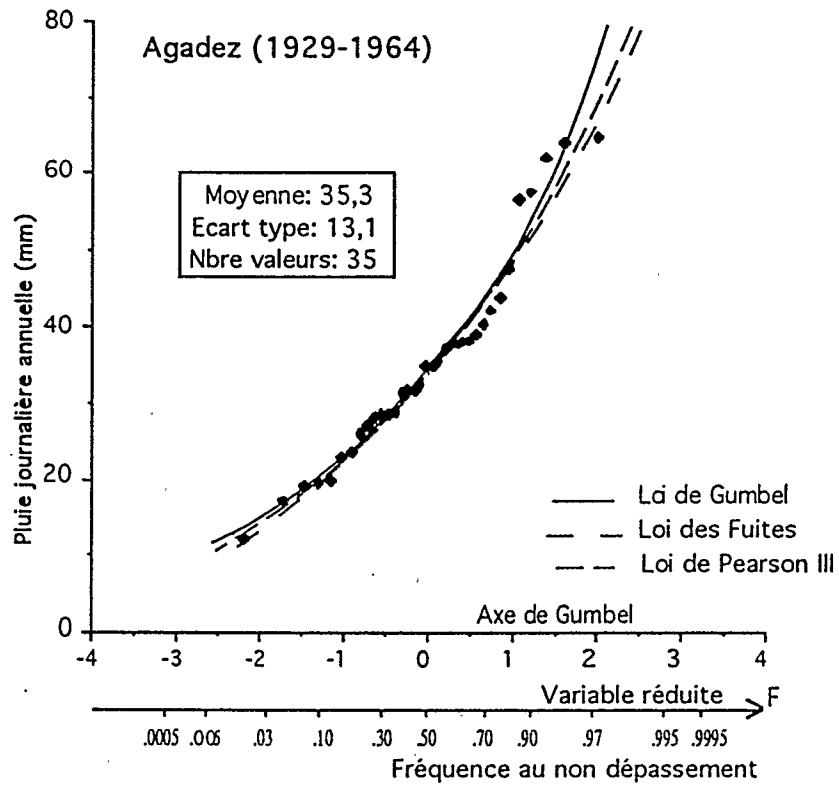
ANNEXE 2-A.III,14 Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Agadez



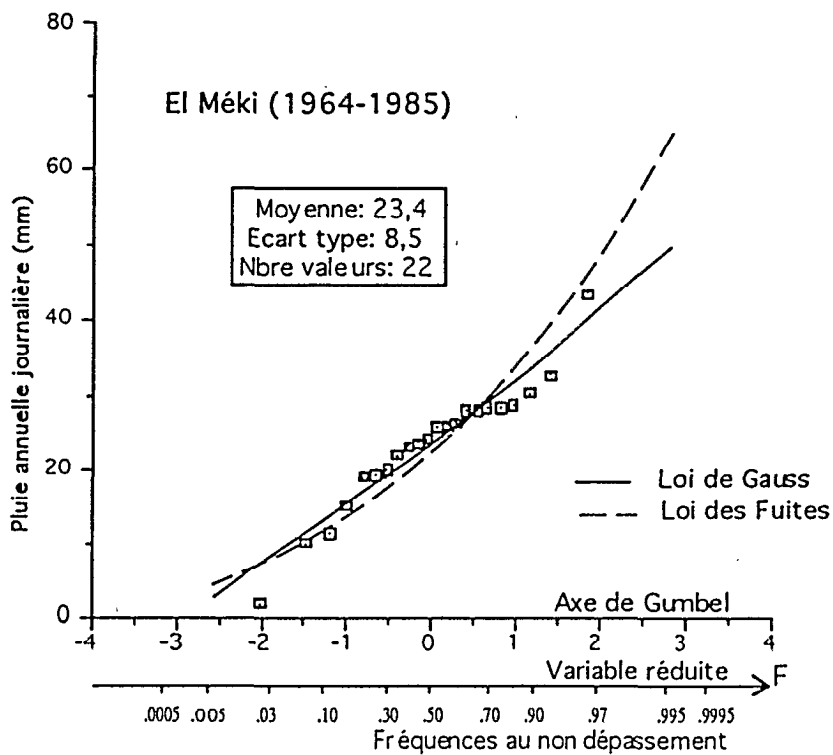
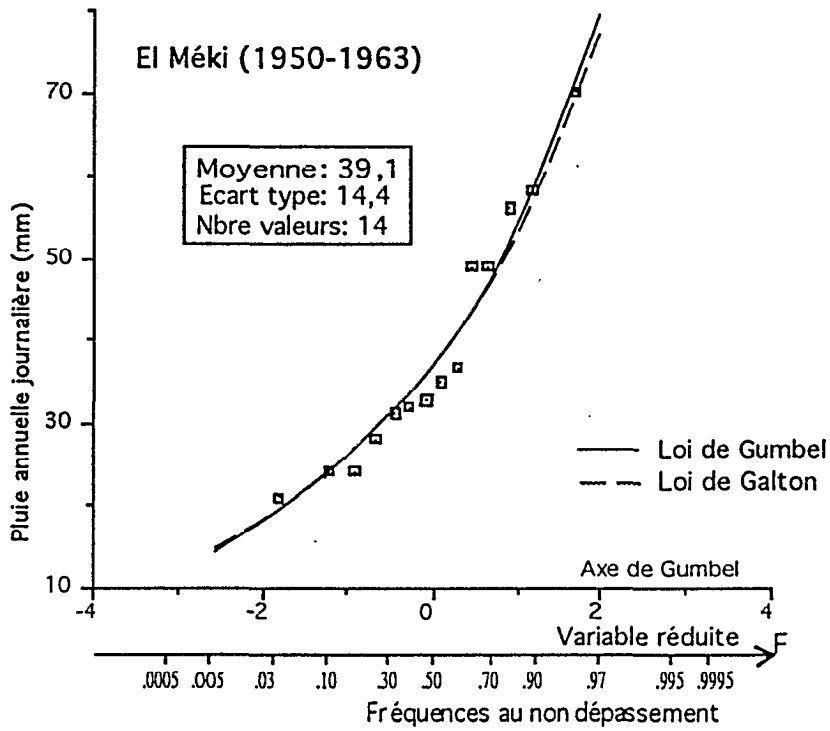
ANNEXE 2-A.III,15 Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Iférouane



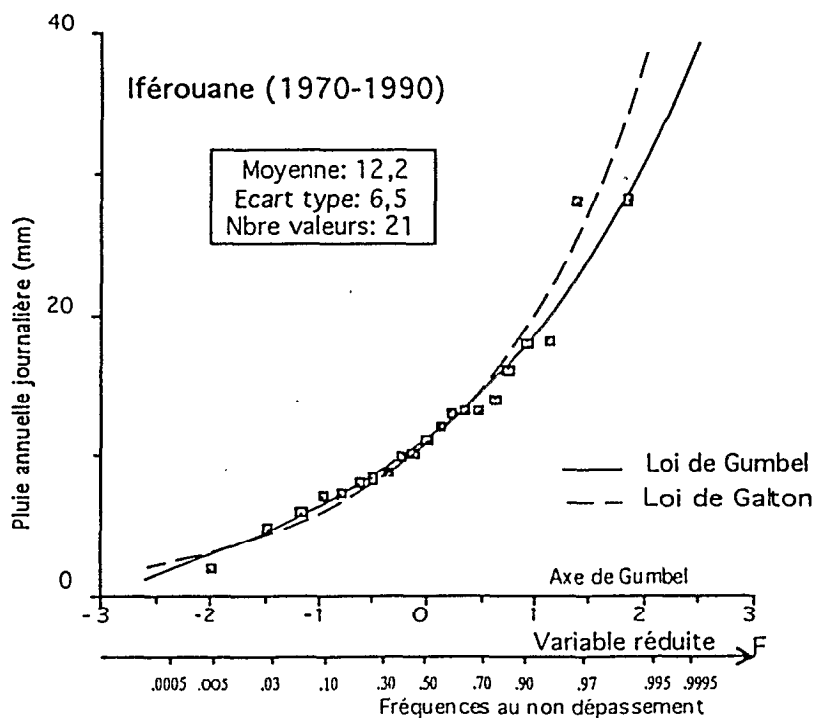
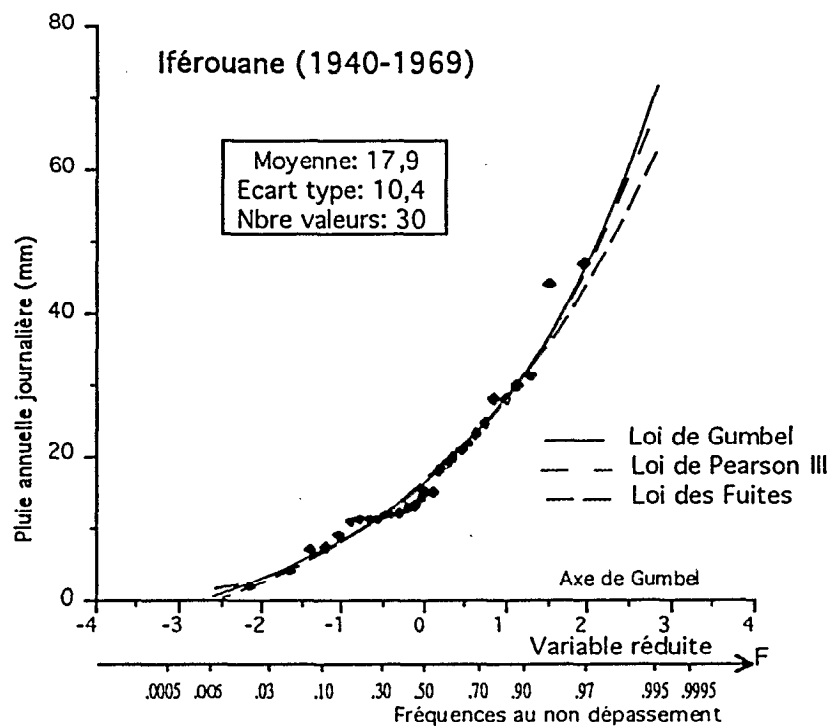
ANNEXE 2-A.III,16 Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Iférouane



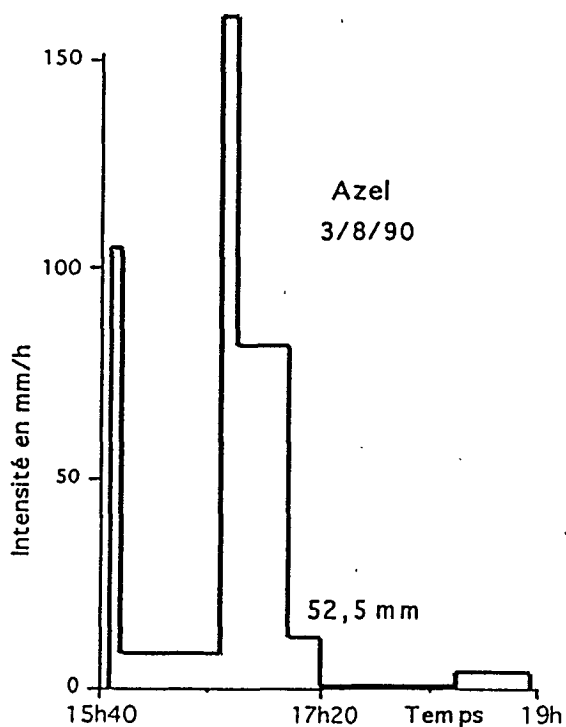
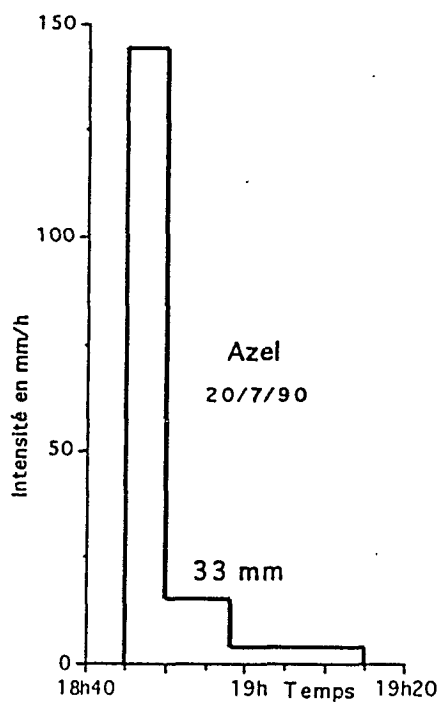
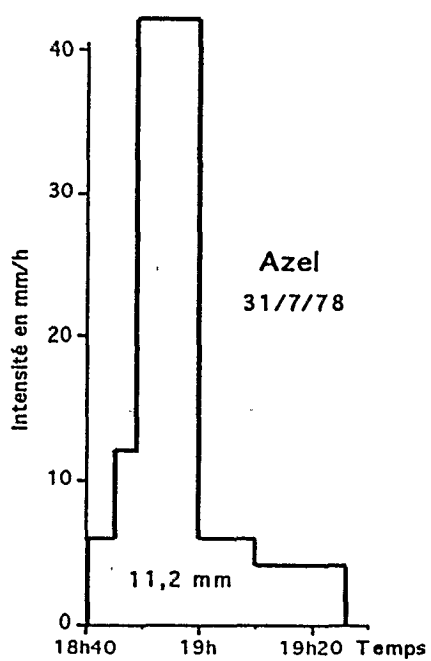
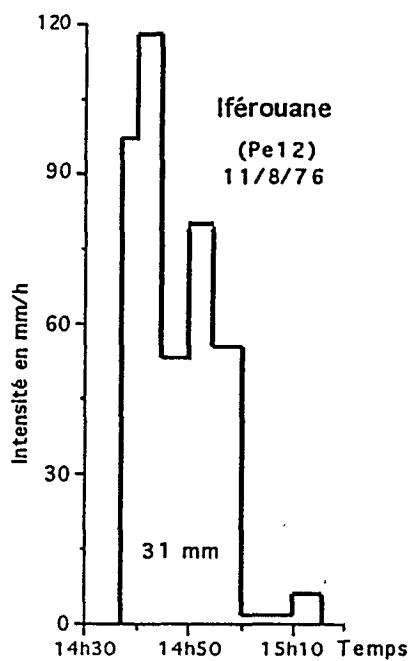
ANNEXE 2-A.III,17 Distributions de la pluie annuelle journalière à Agadez, séquences humide et sèche



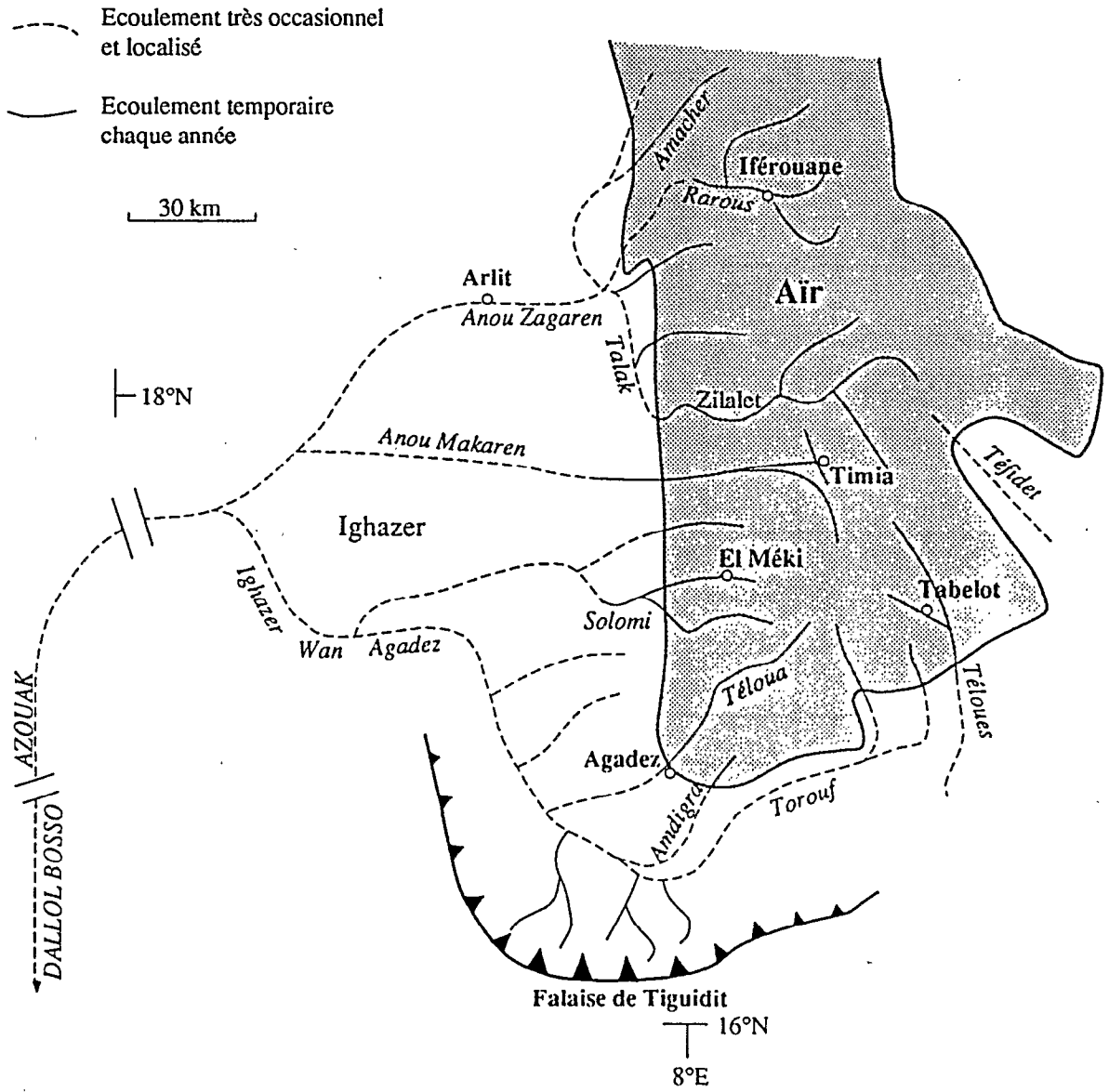
ANNEXE 2-A.III,18 Distributions de la pluie annuelle journalière à El Méki, séquences humide et sèche



ANNEXE 2-A.III,19 Distributions de la pluie annuelle journalière à Iférouane, séquences humide et sèche



ANNEXE 2-A.III,20 Hyétoqrammes des pluies de l'Air



ANNEXE 2-B.I,1 : Réseau hydrographique de l'Air et de l'Ighazer

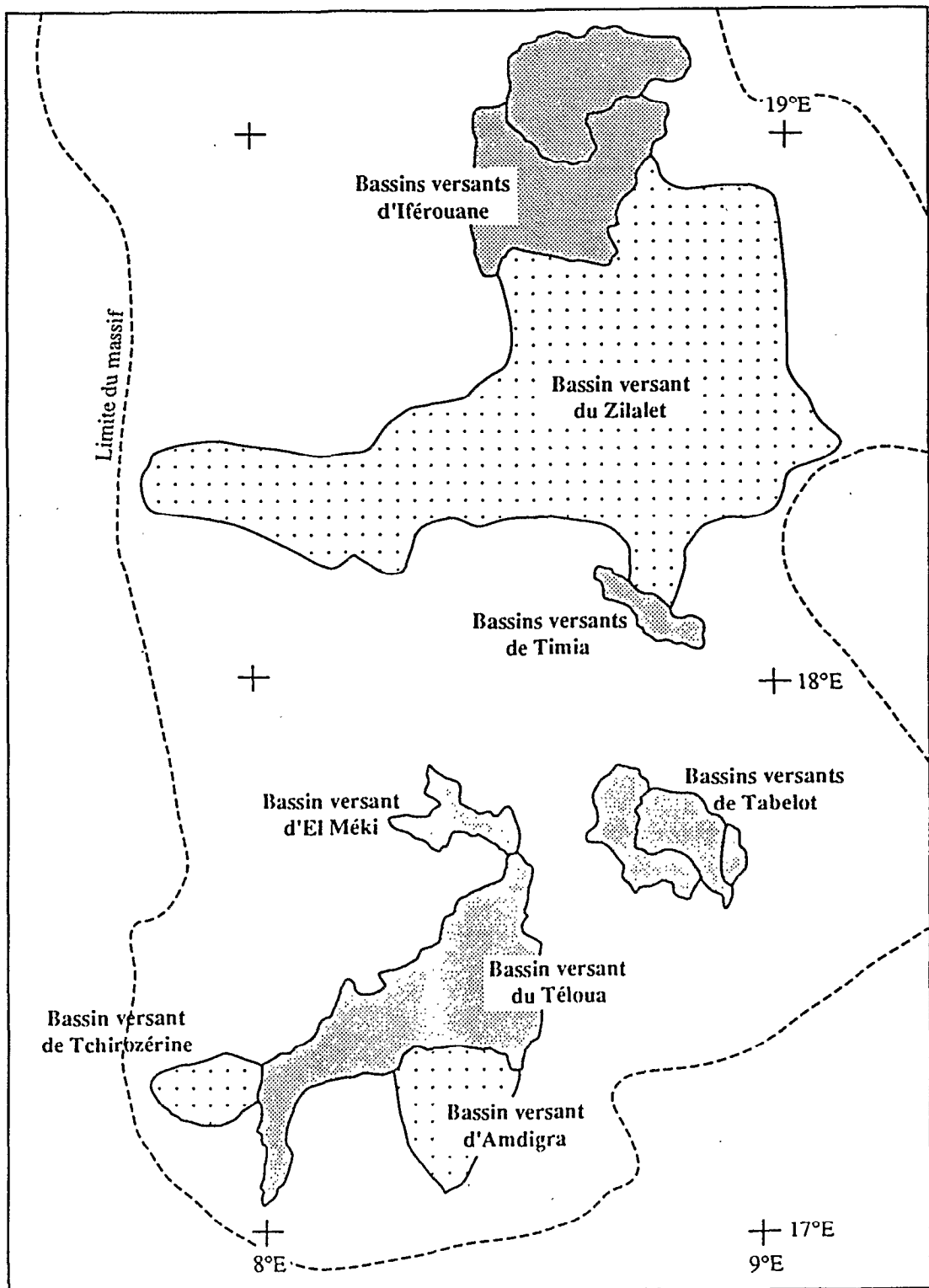
BASSIN VERSANT	Sous Bassin	Coordonnées à l'exutoire	Période d'observation
AMDIGRA		17°00'N; 8°22'E	1975
EL MEKI		17°45'N; 8°17'E	58 à 60 et 74 à 81
IFEROUANE	Tamgak Iberkoum Iférouane	19°04'N; 8°25'E	58 à 60 et 75 à 80
TABELOT	Akrereb Téloues Nabarou	17°34'N; 8°58'E	1977 à 1980
TCHIROZÉRINE		17°15'N; 7°50'E	1973 à 1981
TELOUA	In Toukoufaouène Dabaga Razel Azal RTA N'Douna	17°03'; 8°03'	59 à 60 puis 64 et 75 à 90
TIMIA	S1 S2 S3 S4	18°07'; 8°46'	1976 à 1981
ZILALET		18°20'; 7°49'	75 à 78

Petits bassins affluents expérimentaux et représentatifs du Téloua

Bassin	Coordonnées	Période d'observation
ACHARAK	17°12'N; 8°08'E	1988 à 1990
AGASSAGHAS	17°02'N; 8°00'E	1978 à 1989
AZAMELLA	17°02'N; 8°01'E	1978 à 1989
Bassin ELEVE	17°03'N; 8°03'E	1983 à 1986
In AZENA	17°09'N; 8°04'E	1959 et 1960
In TIZIOUEN I	17°09'N; 8°04'E	1959 et 1960
In TIZIOUEN II	17°09'N; 8°04'E	1959 et 1960

ANNEXE 2-B.I,2

SITUATION ET PERIODE D'OBSERVATION DES BASSINS DE L'AÏR



ANNEXE 2-B.I,3 : Situation des bassins étudiés dans l'Aïr

Morphométrie

Paramètres morphométriques	TAMGAK	IBERKOUM	IFEROUANE
Superficie (km ²)	620	845	1550
Altitude maximale (m)	1990	1840	1990
Altitude minimale (station)	680	650	640
Périmètre stylisé (km)	125	164	192
Coefficient de compacité	1,42	1,58	1,40
Long. rectangle équivalent (km)	50,6	69,9	76,9
Larg. rectangle équivalent (km)	12,0	12,1	19,2
Dénivelée spécifique (m)	960	1075	985
Pente globale IG (%)	1,89	1,54	1,28
Indice de pente Ip Roche	0,157	0,092	0,128

Hypsométrie

Altitude > à (m)	% de superficie du bassin à l'altitude considérée		
	Tamgak	Iberkoum	Iférouane
1600	30	5	15
1200	77	24	45
800	97	58	72
680	100	98	97
640		100	100

ANNEXE 2-B.I,4

Tab.1 : Caractères physiques des bassins d'IFEROUANE

Morphométrie

Paramètres morphométriques	Bassin I	Bassin II	Bassin III	Bassin IV
Superficie (km ²)	40,3	7,1	63,8	156,3
Altitude maximale (m)	1874	1532	1737	1874
Altitude minimale (station)	1116	1111	1110	1055
Périmètre stylisé (km)	34	12,8	36,3	81,7
Coefficient de compacité	1,51	1,36	1,28	1,84
Long. rectangle équivalent (km)	14,2	4,97	13,4	36,6
Larg. rectangle équivalent (km)	2,85	1,43	4,77	4,28
Dénivelée spécifique (m)	485	245	360	510
Pente globale IG (%)	3,42	4,93	2,69	1,39
Indice de pente Ip Roche	0,215	0,238	0,190	0,136

Hypsométrie

Altitude > à (m)	% de superficie du bassin à l'altitude considérée			
	Bassin I	Bassin II	Bassin III	Bassin IV
1874	0	0	0	0
1760	3	0	0	0,8
1680	7	0	0,9	2,2
1600	17	0	1,4	4,9
1520	35	0,1	6,3	12
1440	58	2,5	15	22
1360	77	5,6	29	34
1280	92	17	55	51
1200	97	25	92	72
1120	99,9	89	98	89
1055	100	100	100	100

ANNEXE 2-B.I,4

Tab. 2 : Caractères physiques des bassins de TIMIA

Morphométrie

Paramètres morphométriques	AKREREB	TELOUES	NABAROU
Superficie (km ²)	26,4	324	244
Altitude maximale (m)	937	1800	1840
Altitude minimale (station)	874	843	883
Périmètre stylisé (km)	25	85	106
Coefficient de compacité	1,38	1,35	1,92
Long. rectangle équivalent (km)	9,86	33	48
Larg. rectangle équivalent (km)	2,64	9,70	5,05
Dénivelée spécifique (m)	60	770	850
Pente globale IG (%)	0,61	2,33	1,77
Indice de pente Ip Roche	0,077	0,140	0,126

Hypsométrie

Altitude > à (m)	% de superficie du bassin à l'altitude considérée		
	Akrereb	Téloues	Nabarou
1760			5
1600		7	40
1400		26	71
1200		29	79
1000		34	80
960		40	81
920	50	66	87
883			100
880	97	87	
874	100		
843		100	

ANNEXE 2-B.I,4

Tab. 3 : Caractères physiques des bassins de TABELOT

Morphométrie

Paramètres morphométriques	DABAGA	AZEL	N'DOUNA
Superficie (km ²)	1024	1360	1635
Altitude maximale (m)	1853	1853	1853
Altitude minimale (station)	634	526	460
Périmètre stylisé (km)	160	235	270
Coefficient de compacité	1,41	1,78	1,86
Long. rectangle équivalent (km)	64	104	121
Larg. rectangle équivalent (km)	16	13	13,6
Dénivelée spécifique (m)	243	345	399
Pente globale IG (%)	0,38	0,35	0,33
Indice de pente Ip Roche	0,081	0,072	0,070

Hypsométrie

Altitude > à (m)	% de superficie du bassin à l'altitude considérée		
	Dabaga	Azel	N'Douna
1853	0	0	0
1400	<1	<1	<1
1200	1	1	1
960	4	3	2
880	14	11	9
840	36	27	22
800	64	48	40
760	80	61	51
720	91	72	60
680	97	79	66
640	100	88	73
600		94	78
560		98	83
540		99	86
520		100	88
500			91
480			97
460			100

ANNEXE 2-B.I,4

Tab. 4 : Caractères physiques du bassin du TELOUA

Morphométrie

Paramètres morphométriques	Acharak	In Azena	Tiziouen I	Tiziouen II
Superficie (km ²)	2,13	2,61	1,87	0,67
Altitude maximale (m)	702	615	650	650
Altitude minimale (station)	590	590	584	588
Périmètre stylisé (km)	8,1	7,0	6,3	3,4
Coefficient de compacité	1,55	1,21	1,29	1,16
Long. rectangle équival. (km)	2,26	2,42	2,41	1,06
Larg. rectangle équival. (km)	0,94	1,08	0,78	0,63
Dénivelée spécifique (m)	84	22,0	31,6	26,0
Pente globale IG (%)	3,7	0,91	1,31	2,45
Densité de drainage (km/km ²)		6,48	6,81	9,63

Hypsométrie d'ACHARAK

Altitude > à (m)	% de superficie du bassin
700	0,3
650	21
640	85
610	91
600	98
590	100

ANNEXE 2-B.I,4

Tab. 5 : Caractères physiques des bassins versants expérimentaux de la région de RAZELMAMOULMI

Morphométrie

Paramètres morphométriques	Agassaghas	Azamella	B. Elèves
Superficie (km ²)	5,8	61	0,306
Altitude maximale (m)	535	670	545
Altitude minimale (station)	510	515	528
Périmètre stylisé (km)	13,5	52	2,40
Coefficient de compacité	1,57	1,86	1,22
Long. rectangle équival. (km)	5,75	23,9	0,834
Larg. rectangle équival. (km)	1,01	2,55	0,367
Dénivelée spécifique (m)	23	124	15,7
Pente globale IG (%)	0,40	0,52	1,88
Densité de drainage (km/km ²)			9,63

Hypsométrie d'AZAMELLA

Altitude > à (m)	% de superficie du bassin
670	0
652	5
636	10
617	20
604	30
595	40
587	50
578	60
567	70
556	80
538	90
528	95
515	100

ANNEXE 2-B.I,4

Tab. 6 : Caractères physiques des bassins versants expérimentaux de la région d'AZEL

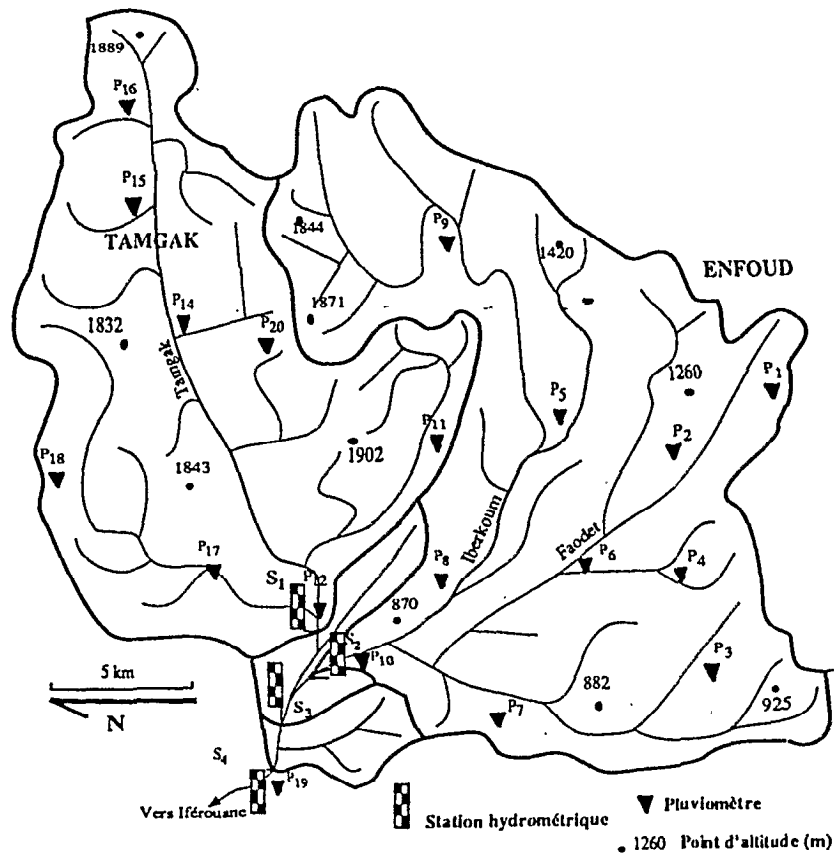


Figure 1 : Bassins versants d'IFEROUANE

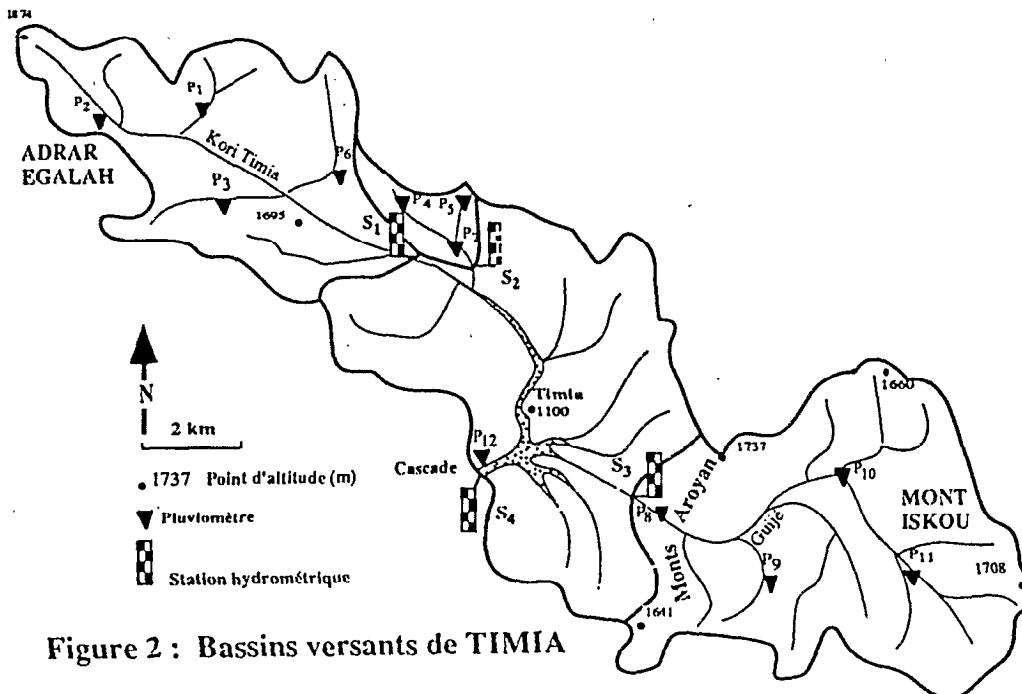


Figure 2 : Bassins versants de TIMIA

ANNEXE 2-B.1,5 Réseau hydrographique et stations hydropluviométriques

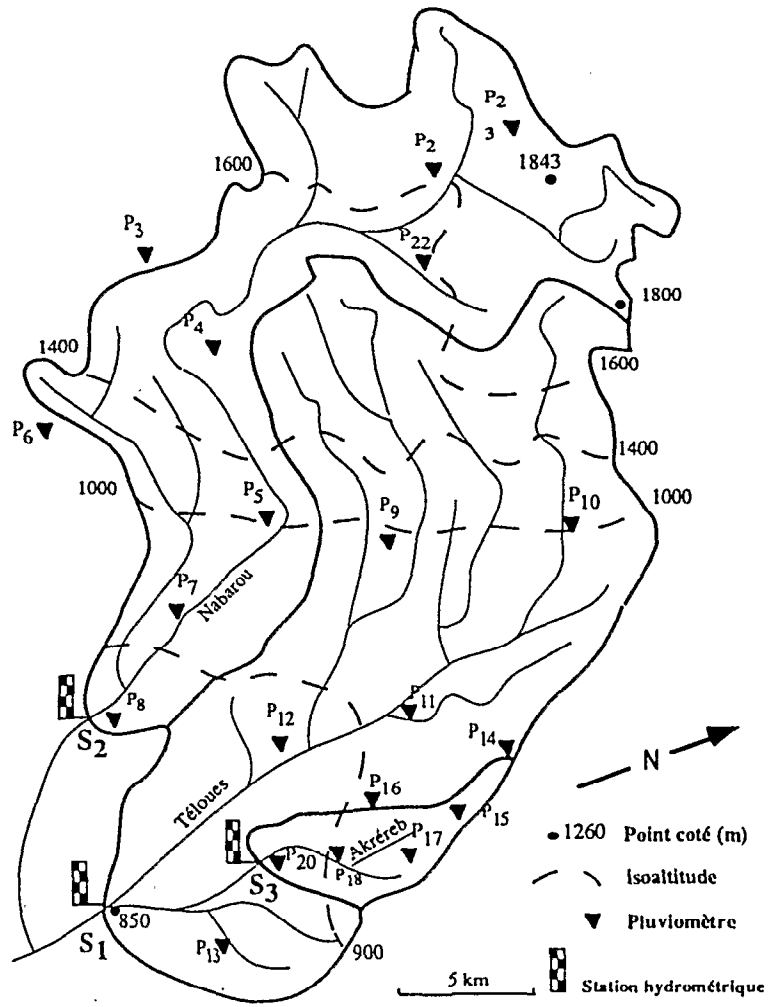


Figure 3 : Bassins versants de TABELOT

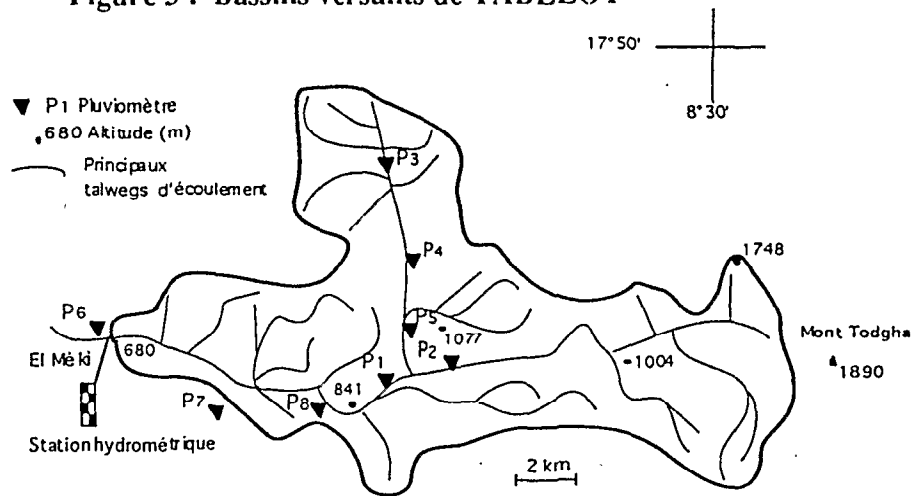


Figure 7 : Bassin versant d'EL MEKI

ANNEXE 2-B.1,5 Réseau hydrographique et stations hydropluviométriques

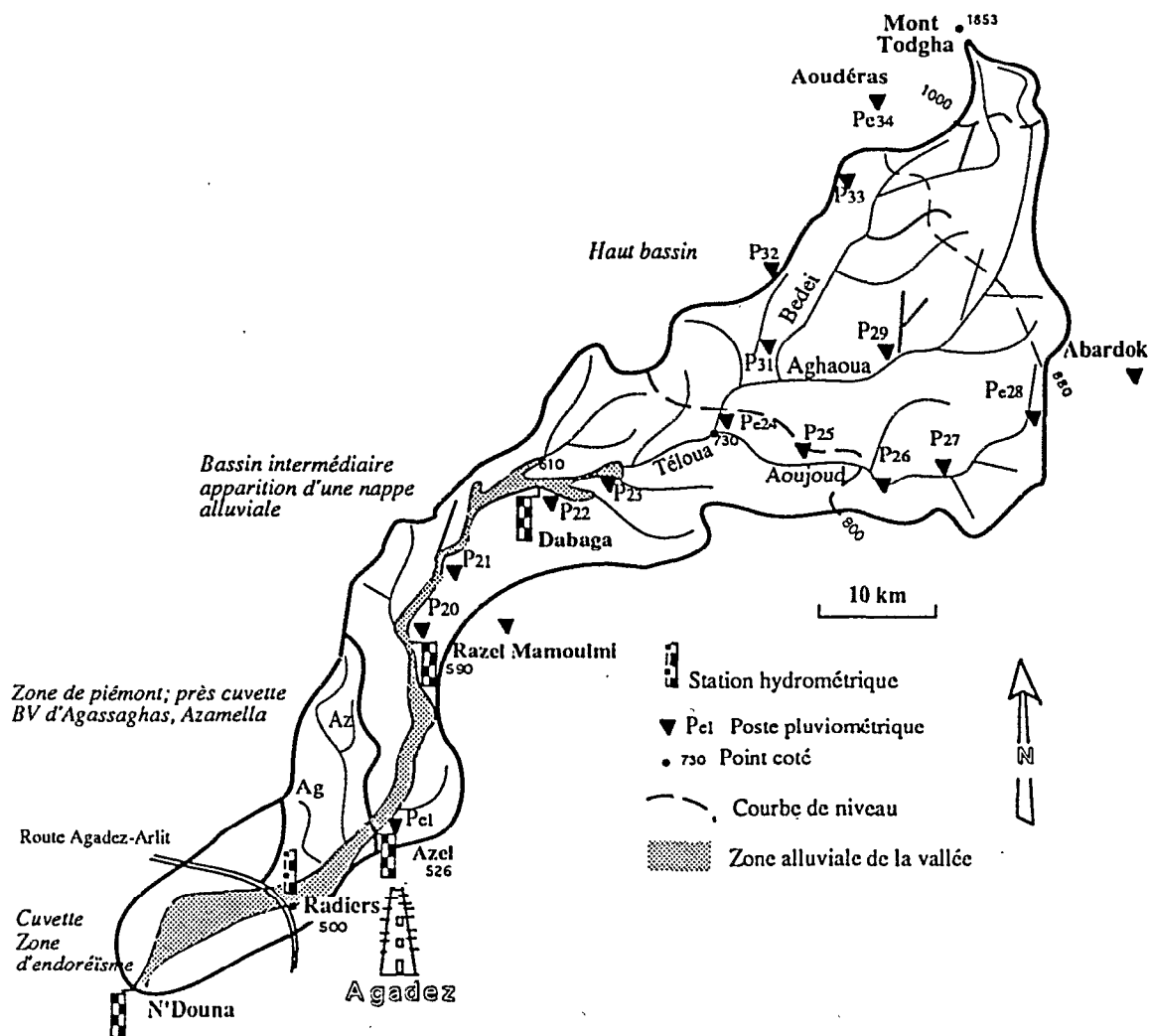


Figure 4 : Bassin versant du Téloua

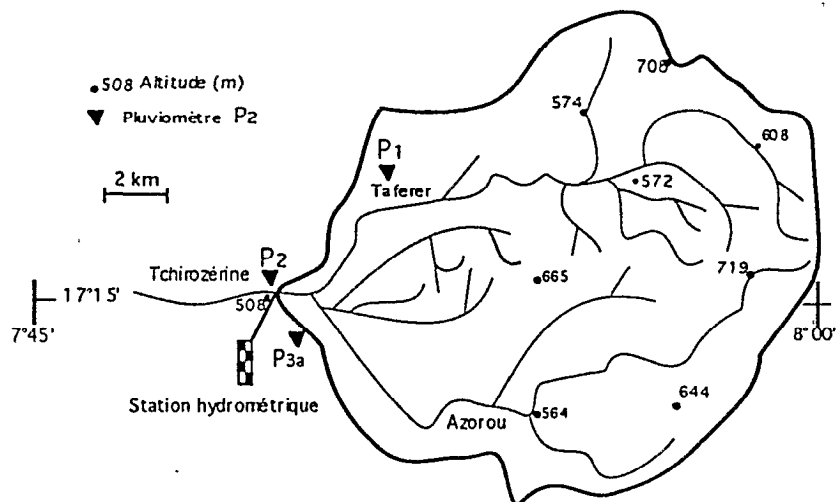
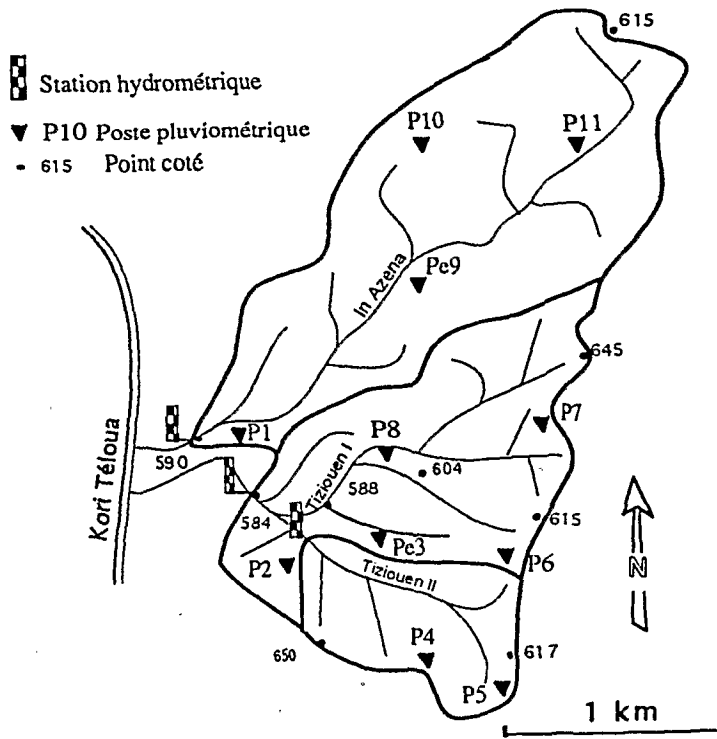


Figure 6 : Bassin versant de Tchirozérine

ANNEXE 2-B.I,5 Réseau hydrographique et stations hydropluviométriques

Bassins d'In Azena, In Tiziouen I et II



Bassin d'Acharak

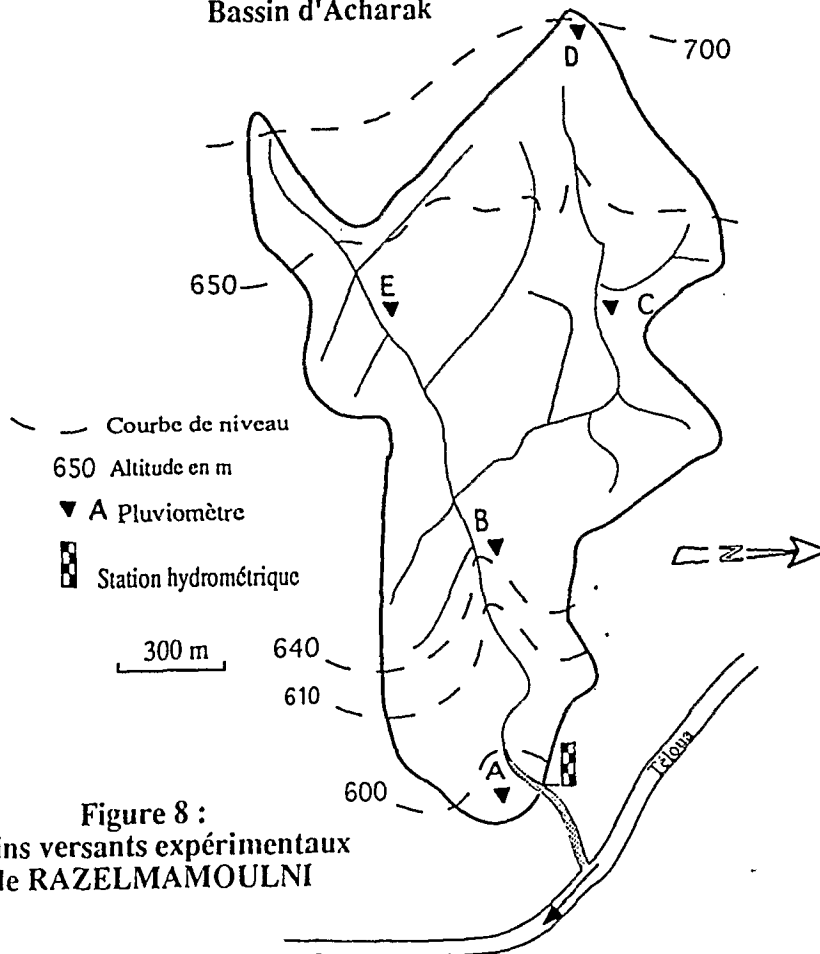


Figure 8 :
Bassins versants expérimentaux
de RAZELMAMOULNI

ANNEXE 2-B.1,5 Réseau hydrographique et stations hydropluviométriques

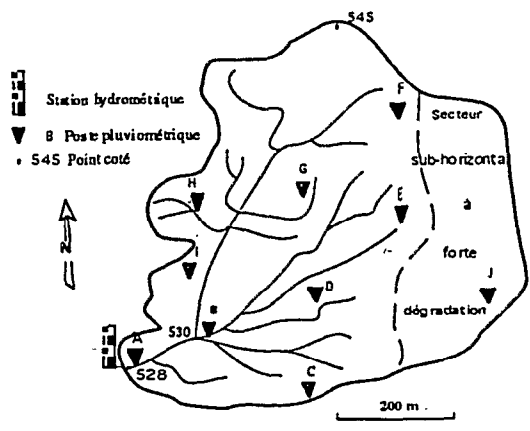


Figure 10 : Bassin expérimental Elèves (Azel)

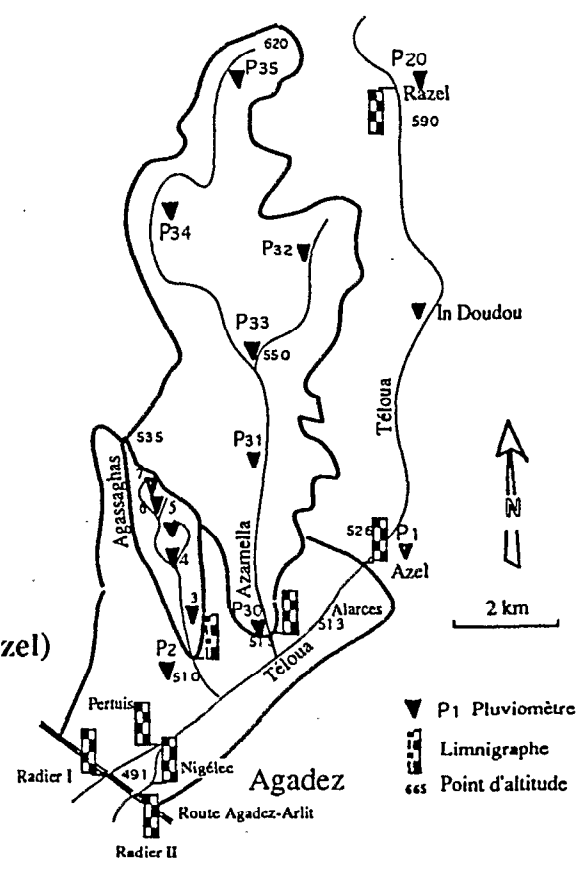


Figure 9 : Bassins versants d'Agassaghas, Azamella

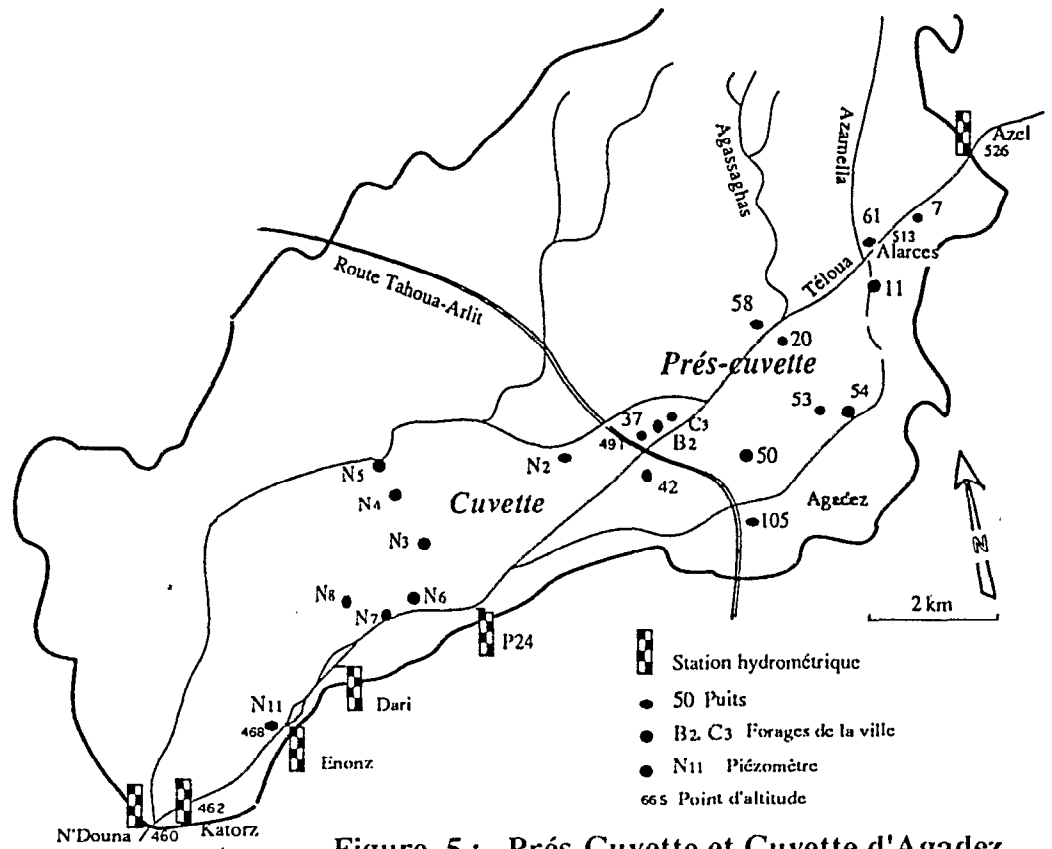
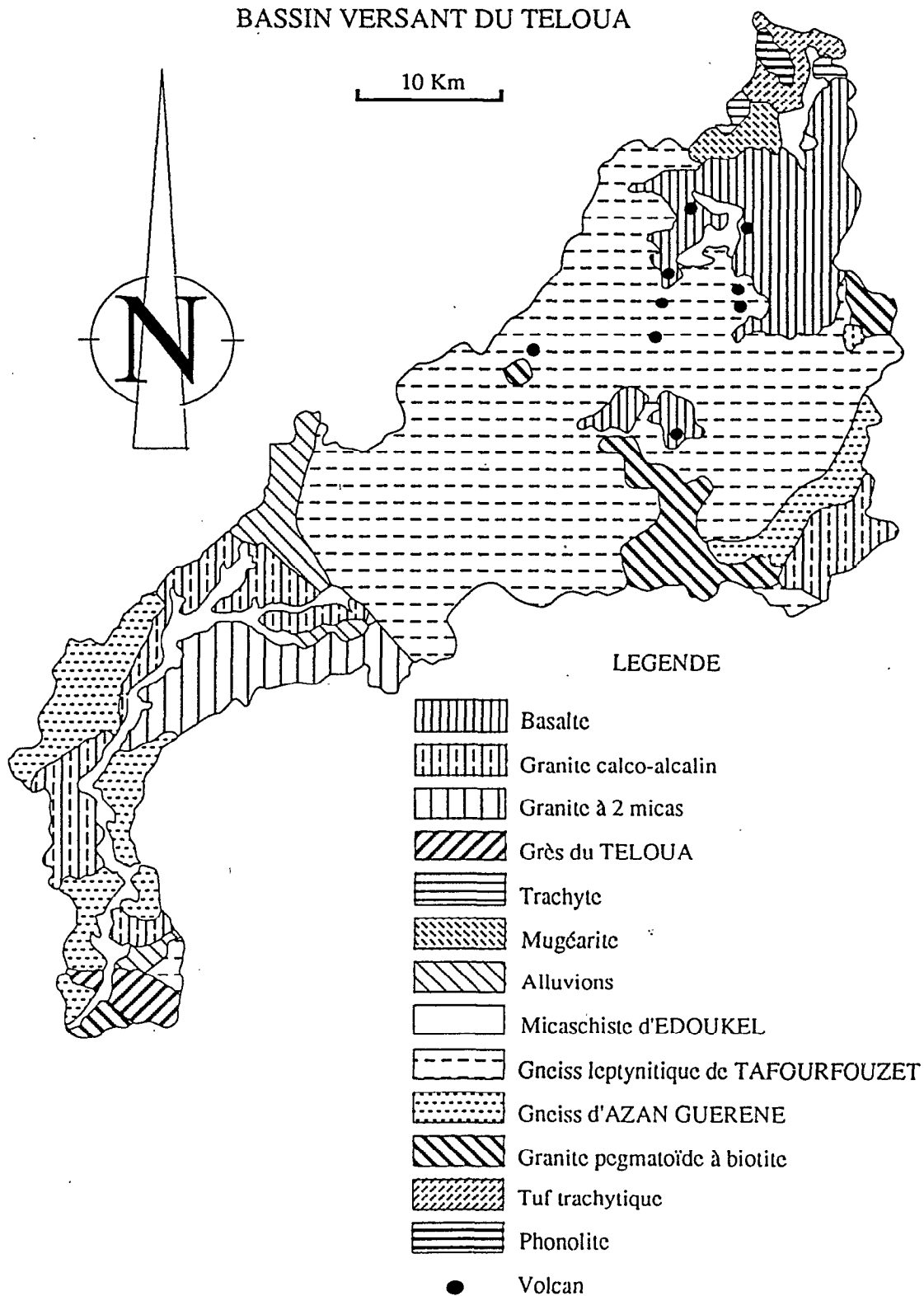


Figure 5 : Prés-Cuvette et Cuvette d'Agadez

ANNEXE 2-B.I,5 Réseau hydrographique et équipements hydro-piézo-pluviométrique

BASSIN VERSANT DU TELOUA



ANNEXE 2-B.III,1 Géologie du bassin versant du Telooua

Azel en 1975

Date	T.m. (mn)	T.e. (h,mn)	Q max (m3/s)	V.e. (10 ³ m ³)	L.e. (mm)
13/07	12	04:10	2,77	7,7	0,006
17/07	25	12:00	50,1	342	0,25
18/07	40	02:10	1,21	5,1	0,004
19/07	110	31:00	15	768	0,56
23/07		170:00	391	12683	9,33
24/08	95	09:00	0,94	19,6	0,014
25/08	60	19:10	6,92	266	0,196
27/08	90	15:40	15,8	145	0,107
28/08	70	209:00	285	14524	10,7

Volume écoulé: 28.750.000 m³
Lame écoulée: 21,1 mm

Pluie moyenne: ?
Coef écou: ? %

Azel en 1976

Date	T.m. (mn)	T.e. (h,mn)	Q max (m3/s)	V.e. (10 ³ m ³)	L.e. (mm)
21/07	35	08:20	24,5	142	0,104
6/08	10	09:10	2,98	35,3	0,026
13/08	210	19:15	10,5	380	0,280
9/09	15	02:00	2,98	11	0,008
10/09	40	05:00	9,46	34,4	0,025
11/09	50	35:00	63,4	1362	1,000

Volume écoulé: 1.965.000 m³
Lame écoulée: 1,4 mm

Pluie moyenne: 77,8
Coef écou: 2 %

ANNEXE 3-A.I.1 Caractéristiques des écoulements à Azel en 1975 et 1976

Azel en 1977

Date	T.m. (mn)	T.e. (h)	Q max (m3/s)	V.e. (10 ⁶ m ³)	L.e. (mm)
13/07	60	4	3,5	0,014	0,010
17-18/07	240	28	115	1,38	1,015
18-19/07	60	14	117	0,817	0,601
19-20/07	60	11	5	0,086	0,063
24-25/07	75	7	8,5	0,104	0,076
25-26/07	100	30	41	0,665	0,489
30/07	1	6	7,5	0,060	0,044
3-5/08	-	48	358	3,84	2,824
5-10/08	1	126	39	3,60	2,647
14-19/08	10	105	28	2,54	1,868
19-20/08	120	20	16	0,156	0,115
20/08-5/09	40	394	360	14,9	10,956
6-15/09	75	209	125	6,3	4,632

Volume écoulé: 34.400.000 m³
Lame écoulée: 25,3 mm

Pluie moyenne: 158 mm
Coef écou: 15,8 %

N'Douna en 1977

Date	T.m.(h)	T.e. (h)	Q max (m3/s)	V.e. (10 ⁶ m ³)	L.e. (mm)
17-19/07	24	66	21	0,724	0,104
3-7/08	24	104	26	0,679	0,026
9-12/08	42	84	0,85	0,394	0,280
20-25/09	81	114	2,80	0,586	0,008
31/08-7/09	71	187	4,30	0,705	0,025
10-12/09	17	52	8,60	0,371	1,000

Volume écoulé: 3.460.000 m³
Lame écoulée: 2,1 mm

Pluie moyenne: 143 mm
Coef écou: 1,5 %

ANNEXE 3-A.I.2 Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1977

Azél en 1978

Date	T.m. (mn)	T.e. (h,mn)	Q max (m3/s)	V.e. (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
4/07	680	3 h10	6,86	0,020	0,015
23/07	25	3 h50	1,53	0,006	0,004
27-31/07	585	84 h30	459	16,2	11,91
31/07-3/08	390	67 h30	291	5,61	4,125
4-6/08	60	52 h30	26,9	0,741	0,545
12-15/08	130	92 h	18,5	1,360	1,000
12/09	65	4 h30	6,16	0,029	0,021
12-13/09	40	23 h40	10,3	0,242	0,178
16/09	5	1 h00	0,480	0,00072	0,0005
16-17/09	10	9 h10	0,87	0,012	0,009
21/09	15	2 h00	0,57	0,0015	0,0011

Volume écoulé: 24,220.000 m3
Lame écoulée: 17,8 mm

Pluie moyenne: 115 mm
Coef écou: 15,5 %

N'Douna en 1978

Date	T.m. (mn)	T.e. (h,mn)	Q max (m3/s)	V.e. (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
27-28/07		24	64	1,080	0,794
1/08	12	13	47	0,351	0,258

Volume écoulé: 1.431.000 m3
Lame écoulée: 0,9 mm

Pluie moyenne: 114 mm
Coef écou: 0,8 %

Azamella en 1978

Date	T.m. (mn)	T.e. (h,mn)	Q max (m3/s)	Ve (10.3 m3)	L.e (mm)
4/07	25	6 h30	31,2	129	2,1
27-28/07	10	14 h30	34,8	346	5,7
28/07	50	6 h30	16,7	90	1,5
1/08	35	4 h15	5,74	39	0,6
9/09	15	1 h40	0,95	3,6	0,1

Volume écoulé: 608.000 m3
Lame écoulée: 10 mm

Pluie moyenne: 103 mm
Coef écou: 9,7 %

Agassaghas en 1978

Date	T.m (mn)	T.e	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m3)	L.e (mm)	Pmoy	Ke (%)
4/07	36	2 h45	8,10	25,5	4,40	21,7	20,3
7/07	13	2 h18	1,60	3,70	0,64	28,4	7
27/07	33	5 h18	1,82	7,90	1,36	28,4	7
1/08	58	3 h04	1,38	5,70	0,98	28,4	6,54
9/09	20	1 h28	2,84	4,42	0,76	7,0	11,4
10/09	1	0 h24	0,025	0,036	0,006	0,7	0,86

Volume écoulé: 47.300 m3
Lame écoulée: 8,15 mm

Pluie moyenne: 95,1 mm
Coef écou: 8,57 %

ANNEXE 3-A.I.3 Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1978

Dabaga 1979

Date	T.e. (h)	Q max (m ³ /s)	V.e. (10 ⁶ m ³)	L.e. (mm)
24-26/6	66	67,4	6,06	5,9
2-5/7	85	118	3,65	3,6
7-8/7	17	8,7	0,067	0,1
22-25/7	63	67,4	1,04	1
25-27/7	57	2,8	0,042	0,04
30/7-2/8	9	2,45	0,163	0,2
16-21/8	125	67,4	2,9	2,8
22-24/8	65	19,8	0,604	0,6
25-27/8	63	7,2	0,861	0,8
29-31/8	48	17,7	1,02	1
4-7/9	63	65,6	1,38	1,4
24-25/9	34	1,8	0,073	0,1
1-2/10	32	2,12	0,08	0,1

Volume écoulé: 17.900.000 m³

Pluie moyenne: 110 mm

Lame écoulée: 17,6 mm

Coef écoult: 16 %

Razel 1979

Date	T.e. (h)	Q max (m ³ /s)	Ve (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
23/07	24	59,3	0,669	0,5
17-19/8	48	28,6	0,921	0,7
19-20/8	32	38,1	1,46	1,2
22-23/8	40	59,3	1,4	1,1
24-25/8	24	14,1	0,379	0,3
29-31/8	6	0,214	0,0038	0,01
31/08	26	3,8	0,092	0,1
4-6/9	36	70,4	2,8	2,2
23-25/9	40	19,6	0,417	0,3

Volume écoulé: 8.140.000 m³

Pluie moyenne: 88,3 mm

Lame écoulée: 7,94 mm

Coef écoult: 9 %

Azel 1979

Date	T.e (h)	Q max (m ³ /s)	Ve (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
24-25/6	19	6,6	0,194	0,1
25-26/6	18	60,1	0,743	0,5
2-5 /7	51	163	4,09	3
6/07	2	4,16	0,0058	0,004
7-8/7	31	22,5	0,339	0,3
16/07	3	3,6	0,0055	0,004
23-24/7	36	7	0,168	0,1
24-25/7	26	53	0,338	0,3
17-18/8	36	7,8	0,284	0,2
20-22/8	54	39,2	1,41	1
22-24/8	47	12,6	0,518	0,4
24-27/8	73	32,5	0,728	0,5
29-30/8	16	3,04	0,056	0,04
30/8-1/9	36	2,2	0,076	0,06
4 au 7/9	72	31,5	1,43	1,1

Volume écoulé: 10.400.000 m³

Pluie moyenne: 127 mm

Lame écoulée: 10,2 mm

Coef écoult: 8 %

ANNEXE 3-A.I,4 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1979

Toudou (radiers Agadez) en 1979

Date	T.e (h)	Q max (m ³ /s)	V.e (10 ³ m3)	L.e (mm)
24-25/06			65	0,04
25-26/07			395	0,26
2-5/07	41		2600	1,73
7-8/07	19	21,8	125	0,10
23-24/07	13	3,21	56	0,04
24-25/07	(4)	30,5	168	0,11
12/08	7	1,1	4	0,003
17-18/08	22	1,2	21	0,01
20-22/08	24	19,5	703	0,47
22-24/08	20	12,9	304	0,20
24-27/08	30	50,3	645	0,43
4-7/09	30	25,2	786	0,52

Volume écoulé: 5.872.000 m³

Pluie moyenne: 102 mm

Lame écoulée: 3,9 mm

Coef écou: 3,82 %

N'Douna + katorz en 1979

Date	T.e (h)	Q max (m ³ /s)	V.e (10 ³ m3)	L.e (mm)
25-26/07	15	0,70	11,3	0,007
2-5/07	44	6,40	273	0,167
7-8/07	23	9,30	154	0,094
12/08	21	9,80	217	0,133
17-18/08	3	2,75	10,5	0,006
20-22/08	30	1,20	37,4	0,02
22-24/08	16	0,16	26,2	0,016
24-27/08	30	15,9	400	0,245
28-29/08	18	0,70	14,4	0,009
29-30/08	30	1,37	66,7	0,040
4-7/09	46	21,9	644	0,394
10/09	3	1,54	4,6	0,003
30/09	4	2,27	7,2	0,004

Volume écoulé: 1.866.000 m³

Pluie moyenne: 102 mm

Lame écoulée: 1,14 mm

Coef écou: 1,12 %

Agassaghas en 1979

Date	T.e (mn)	T.m	Qmax(m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)	Pmoy	Ke (%)
6/07	18	5	0,117	0,063	0,01	4,1	0,24
7/07	30	12	0,320	0,447	0,08	3,1	2,58
12/08	50	30	0,160	0,226	0,04	0,9	4,44
24/08	175	32	16,0	48,3	8,33	24,9	33,5
5/09	320	20	0,035	0,209	0,04	13	0,31
30/09	22	9	0,210	0,191	0,03	1,9	1,58

Volume écoulé: 49500 m³

Pluie moyenne: 75 mm

Lame écoulée: 8,5 mm

Coef écou: 11,3 %

Azamella en 1979

Date	T.e (mn)	T.m	Qmax(m ³ /s)	V.e (10 ³ m3)	L.e (mm)	Pmoy	Ke (%)
5/07	120	50	0,429	0,426	0,007		
6/07	90	15	1,51	1,51	0,025		
7/07	110	19	5,0	8,14	0,133		
17/07	90	30	0,429	0,597	0,01		
18/07	155	15	15,4	34,9	0,57		
24/07	240	20	58	208	3,41	16,6	20,5
12/08	35	5	0,018	0,029	0,0005	0,6	~ 0
24/08	240	50	49,6	161	2,64	14,4	18,3
4/09	120	65	0,032	0,077	0,0013	9,9	~ 0
30/09	60	3	0,025	0,036	0,0006	4,2	~ 0

Volume écoulé: 415.000 m³

Pluie moyenne: 81 mm

Lame écoulée: 6,8 mm

Coef écou: 8,4 %

ANNEXE 3-A.I,5 Caractéristiques des écoulements; Cuvette d'Agadez 1979

Dabaga

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)	Pmoy	Ke (%)
6-7/05	19	9,40	0,25	0,2	4,8	5
14/05	3	19,7	0,06	0,06		
3-4/06	27	25,9	0,71	0,7	47,9	37
5-6/06	29	52,7	1,31	1,3		
6-9/06	82	14	1,62	1,6		
28-29/06	15	8,7	0,22	0,2		
29-2/07	84	33,8	1,08	1		
3-4/07	26	592	11,4	10,9		
4-5/07	26	82	0,86	0,8		
6/07	17	15,2	0,32	0,3		
6-10/07	90	38	0,86	0,8		
12-13/07	22	102	1,01	1		
13-14/07	23	56,8	0,64	0,6	38,8	45
14-18/07	103	585	11,2	10,7		
18-19/07	22	62,6	1,22	1,2		
19-22/07	71	140	3,20	3,1		
22-24/07	31	3,9	0,26	0,2		
24/07	14	4,9	0,18	0,2		
24-28/07	92	3,8	0,46	0,4		
3-5/08	44	9,4	0,21	0,2		
5-9/08	82	19,7	0,54	0,5	46,6	20
14-15/08	8	1,8	0,02	0,02		
18/08	15	106	2,88	2,8		
18-22/08	93	130	3,93	3,8		
22-24/08	34	5,5	0,33	0,3		
24-25/08	40	4,4	0,37	0,4		
25-29/08	98	49,5	1,12	1,1		
30-31/08	28	8,4	0,72	0,7		
31/08-3/09	66	7,6	0,51	0,5	15,1	12
3-4/09	16	39,6	0,62	0,6		
4-5/09	25	4,1	0,27	0,3		
5-8/09	68	3,9	0,44	0,4	3,0	23

Volume écoulé: 48.700.000 m³
Lame écoulée: 47,7 mm

Pluie moyenne: 156 mm
Coef écou: 30 %

Razel

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)	Pmoy	Ke (%)
6-7/05	15	12,4	0,191	0,15	7,3	4
14-15/05	8	10,2	0,111	0,09		
28-29/05	16	24,3	0,343	0,3	53,6	21
4/06	2	1,5	0,006	0,005		
5-6/06	23	3,2	0,154	0,12		
12-13/06	9	9,0	0,113	0,09		
28-29/06	19	6,1	0,047	0,03		
29/06	28	28,7	0,423	0,34		
30/06-3/07	69	33,2	1,001	0,79		
3-4/07	29	562	8,640	6,86		
4-5/07	23	51	1,824	1,45		
5-6/07	10	11,9	0,175	0,14		
6/07	16	11,3	0,359	0,29		
7-12/07	136	26,5	1,235	0,98		
13/07	16	34,4	0,921	0,73			41,9	47
13/07	7	30,9	0,324	0,26		
13-14/07	17	24,3	0,756	0,60		
14-19/07	109	468	15,53	12,3		
19/07	18	38	1,047	0,83		
20-21/07	44	157	4,34	3,44		
21-24/07	64	98	1,936	1,54		
25/07-2/08	204	2,7	0,223	0,18		
3-5/08	43	34,4	0,699	0,56		
5-14/08	217	147	2,288	1,82		
14-18/08	82	10,7	0,190	0,15	46,6	16
18/08	21	95,8	2,146	1,70		
18-23/08	107	120	3,016	2,39		
23-25/08	55	0,9	0,121	0,10		
25-26/08	20	29,8	0,341	0,27		
26-30/08	101	5,7	0,587	0,47		
30-31/08	20	4,4	1,134	0,90		
31/08-1/09	19	51	0,825	0,66		
1-3/09	32	2,9	0,198	0,16	16,3	15
3-4/09	9	17	0,113	0,10		
4/09	15	21,1	0,450	0,36		
4-17/09	307	4,6	0,316	0,25		

Volume écoulé: 52.100.000 m³
Lame écoulée: 40,7 mm

Pluie moyenne: 168 mm
Coef écou: 24 %

ANNEXE 3-A.I,6 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1980

Azel en 1980

Date	T.e(h)	Qmax (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)	Pmoy	Ke (%)
6/05	3	7,7	0,042	0,04	7,1	0,56
14/05	14	0,5	0,014	0,01		
28-29/05	14	28,2	0,206	0,15		
28-29/06	7	6,7	0,059	0,04		
29-30/06	13	33	0,280	0,21		
30/06-1/07	27	15,4	0,580	0,43		
2/07	6	0,2	0,006	0,004	53,7	14
3/07	8	21,0	0,221	0,16		
4/07	23	344	5,423	3,99		
5/07	22	47	1,661	1,22		
6-7/07	32	12,9	0,914	0,67		
7-10/07	72	22,8	1,163	0,86		
12-13/07	12	210	1,724	1,27		
13/07	13	28,2	0,796	0,59		
13-14/07	7	35	0,480	0,35		
14/07	15	21,9	0,680	0,50		
14-19/07	106	416	9,885	7,27		
19-20/07	18	29,2	0,771	0,57	43,5	36
20-21/07	42	136	4,464	3,28		
21-22/07	24	189	1,679	1,24		
23-24/07	37	1,8	0,152	0,11		
24/07	7	19,2	0,202	0,15		
25-29/07	102	7,6	0,497	0,37		
4-5/08	40	26	0,711	0,52		
5-9/08	118	132	2,653	1,95		
14/08	8	40,8	0,185	0,14		
15/08	30	6,5	0,198	0,15		
18/08	12	31,2	0,442	0,33		
18/08	10	73,6	1,485	1,09	46,0	17
19-23/08	117	124	4,104	3,02		
24-26/08	44	1,1	0,071	0,05		
26/08	17	17,7	0,505	0,37		
26-29/08	83	6,5	0,530	0,39		
31/08	21	34,1	1,083	0,80		
31/08-2/09	51	38,4	1,058	0,78		
3/09	12	2,2	0,060	0,04		
3-4/09	10	5,4	0,071	0,05	18,9	13
4/09	17	17,1	0,503	0,37		
4-8/09	92	20,7	0,561	0,41		

Volume écoulé: 46.000.000 m³
Lame écoulée: 33,8 mm

Pluie moyenne: 169 mm
Coef écou: 20 %

ANNEXE 3-A.I,7 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1980

Toudou (radiers Agadez) en 1980

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ³ m ³)	L.e (mm)
28-29/05	15	6	52	0,04
28-29/06	15	5,6	108	0,07
29/06-1/07	37	10,4	234	0,16
3-7/07	64	189	4765	3,16
7-10/07	24	14,7	682	0,45
12-13/07	32	211	2532	1,68
13-14/07	24	28,2	1462	0,97
14-19/07	106	274	5208	3,46
19-20/07	13	9,4	313	0,21
20-21/07	45	121	2435	1,62
21-24/07	40	59	672	0,45
24-29/07	43	10,1	186	0,12
4-5/08	32	2,4	63	0,04
5-9/08	49	45,8	1350	0,90
14-16/08	19	135	551	0,37
18/08	10	31,4	494	0,33
18/08	22	71,6	1286	0,85
19-23/08	80	83	3422	2,27
26/08	16	13,1	411	0,27
26-30/08	34	6,5	301	0,20
31/08	26	29	1278	0,85
31/08-2/09	56	38,3	1242	0,82
3-4/09	15	15,7	522	0,35
4-8/09	38	22	605	0,40

Volume écoulé: 33.154.000 m³
Lame écoulée: 22 mm

Pluie moyenne: 187 mm
Coef écou: 11,8 %

N'Douna + katorz en 1980

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ³ m ³)	L.e (mm)
28-29/05	12	0,82	9	0,006
12-13/06	19	23	188	0,12
28-29/06	13	2,64	59	0,04
29/06-1/07	44	5,78	180	0,11
3-7/07	70	75,8	2580	1,58
7-10/07	15	0,41	6	= 0
12-13/07	25	4,88	114	0,07
13-14/07	23	4,2	179	0,11
14-19/07	62	115	3584	2,19
20-21/07	43	11,7	991	0,61
21-24/07	48	9,85	626	0,38
5-9/08	34	0,68	24	0,02
14-16/08	10	0,05	1	= 0
18/08	6	0,4	8	= 0
18/08	24	17,85	587	
19-23/08	76	19,9	2474	1,87
26-30/08	36	7,2	524	0,32
31/08	9	0,14	3	= 0
31/08-2/09	38	3,17	249	0,15
4-8/09	22	2,34	111	0,07

Vomume écoulé: 12.500.000 m³
Lame écoulée: 7,65 mm

Pluie moyenne: 187 mm
Coefficient d'écoulement: 4,1 %

ANNEXE 3-A.1, 8 Caractéristiques des écoulements de la cuvette d'Agadez (Radiers et N'Douna en 1980)

Azamella en 1980

Date	T.e(mn)	T.m(mn)	Qmax(m ³ /s)	V.e(10 ³ m ³)	L.e(mm)	Pmoy	Ke (%)
6/05			1	2,5	0,04	18	
14/05	240	45	0,62	3,04	0,05	18	0,5
28/05	285	60	,90	5,06	0,08	16,6	0,5
28/06	310	130	43,8	157	2,6	14,1	18
29/06	200	5	13,2	48,8	0,8	5,3	15
3/07	720	270	50,8	297	4,9	19,4	
4/07	620	60	68,8	364	6,0	19	56
5/07	75	16	0,11	0,25	0,004	2,2	1
12/07	550	65	88	399	6,5	19,7	33
13/07	875	55	8,0	57	0,9	1,8	52
14/07	435	125	31	237	3,9	12,4	31
22/07	380	90	16,4	70,7	1,2	4,1	29
24/07	343	30	2,07	12	0,20	8,5	2
5/08	415	15	1,51	15,2	0,25	7,2	3
14/08	410	70	98,8	417	6,8	28,3	24
18/08	735	105	52	272	4,5	22,4	20
18/08	385	35	15,4	30,2	0,5	5,1	10
20/08	165	25	0,248	1,07	0,02	4,1	0,4
30/08	805	35	20,2	7509	1,2	11,2	11
4/09	830	95	8,80	51,2	0,8	4,5	18

Volume écoulé: 2.520.000 m³
Lame écoulée: 41,3 mm

Pluie moyenne: 223 mm
Coef écou: 18,5 %

Agassaghas en 1980

Date	T.e(mn)	T.m(mn)	Qmax(m ³ /s)	V.e(10 ³ m ³)	L.e(mm)	Pmoy	Ke (%)
28/06	300	90	5,76	25,1	4,3		
29/06	122	46	3,13	8,52	1,5	28,5	20
3/07	306	40	3,67	14,9	2,6		
5/07	300	20	7,15	19,1	3,3		
5/07	180	10	0,63	1,67	0,3	14,6	42
12/07	230	60	5,76	23,7	4,1	18,8	22
14/07	150	50	1,50	6,53	1,1	7,9	14
24/07	205	72	3,44	14,9	2,6	10,4	25
14/08	165	67	8,22	24,4	4,2	12,1	35
18/08	390	120	10	51,1	8,8	23,6	37
18/08	295	40	13,3	53,1	9,2	16,3	56

Volume écoulé: 243.000 m³
Lame écoulée: 41,9 mm

Pluie moyenne: 149,8 mm
Coef écou: 28 %

ANNEXE 3-A.I,9 Caractéristiques des écoulements de la cuvette d'Agadez en 1980 (Agassaghas, Azamella)

Dabaga 1981

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
14-15/06	17	8,8	0,11	0,11
16/06	11	165	1,50	1,44
18/06	2	1,1	0,01	0,01
19-20/06	35	8,8	0,18	0,17
21-22/06	20	3,0	0,07	0,07
23-24/07	5	3,9	0,05	0,05
26-27/07	29	41,8	0,99	0,95
27-29/07	40	43,4	1,17	1,12
29-31/07	50	177	5,24	5,03
31/07-3/08	81	82,6	2,10	2,01
4-5/08	41	1,4	0,12	0,12
6-7/08	19	45,1	1,03	0,99
7-9/08	52	4,5	0,25	0,24
28-31/08	55	238	5,96	5,72
31/08-3/09	79	24,8	0,54	0,52

Volume écoulé: 19.500.000 m³
Lame écoulée: 18,7 mm

Pluie moyenne: 108 mm
Coef écou: 17%

Razel en 1981

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
14-16/06	29	82,6	1,02	0,8
16-18/06	48	165	2,80	2,2
11/07	2	2	0,0072	0,006
19/07	6	16,2	0,06	0,05
26-27/07	19	14,6	0,73	0,6
27-29/07	46	32	1,65	1,3
29-31/07	102	179	5,28	4,1
31/07-5/08	145	84,8	3,49	2,7
5-6/08	14	7,9	0,14	0,1
7-9/08	62	21	0,75	0,6
13-14/08	18	20,2	0,85	0,3
20-21/08	17	6,9	0,18	0,1
25-26/08	30	6,9	0,20	0,2
28-30/08	42	340	8,53	6,7
30/08-3/09	126	24,3	2,86	2,2

Volume écoulé: 28.040.000 m³
Lame écoulée: 22,3 mm

Pluie moyenne: 119,8 mm
Coef écou: 18,6 %

Azel en 1981

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
15/06	15	4,0	0,16	0,12
15-17/06	49	200	3,21	2,36
19-20/07	10	15,7	0,12	0,09
23/07	1	1,1	0,01	0,01
27-28/07	27	13,5	0,45	0,33
28-29/07	29	12,5	0,64	0,47
29-31/07	47	262	8,14	5,99
31/07-4/08	90	52	3,17	2,33
6/08	16	0,8	0,04	0,03
7-9/08	52	10,5	0,33	0,24
26-27/08	12	22,2	0,11	0,08
29/08-3/09	142	270	7,61	5,60

Volume écoulé: 24.100.000 m³
Lame écoulée: 17,7 mm

Pluie moyenne: 119 mm
Coef écou: 14,9 %

ANNEXE 3-A.I,10 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1981

Dabaga en 1982

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
3-4/06	47	162	2,896	2,8
4-6/08	53	123	2,238	2,1
7-8/08	17	29,8	0,163	0,2
8-9/08	21	2,60	0,096	0,1
9-10/08	15	2,00	0,054	0,05
10-11/08	38	5,20	0,253	0,2
12-14/08	25	134	3,439	3,3
13-14/08	12	13,5	0,337	0,3
14-16/08	29	22,3	0,529	0,5
18-19/08	22	17,2	0,404	0,4
19-21/08	54	9,50	0,564	0,5
21-22/08	22	2,30	0,082	0,08
22-24/08	51	31,0	1,334	1,3
24-28/08	89	101	2,946	2,8
28-29/08	19	1,20	0,023	0,02
31/08-4/09	96	204	2,873	2,8

Volume écoulé: 18.200.000 m³
Lame écoulée: 17,5 mm

Pluie moyenne: 126 mm
Coef écoult: 13,9 %

Razel en 1982

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
3-4/06	48	150	2,444	1,9
4-6/08	46	85	2,457	2,0
6-7/08	22	70,8	0,405	0,3
7-8/08	22	91,6	1,535	1,2
8-9/08	22	26,0	0,210	0,2
9-10/08	22	2,20	0,054	0,04
10-12/08	43	1,10	0,053	0,04
12-14/08	46	52,8	1,188	0,9
14-17/08	72	43,4	1,600	1,3
18-19/08	26	58,0	0,861	0,7
19-20/08	22	27,2	0,606	0,5
20-22/08	52	5,0	0,376	0,3
22-25/08	57	19,0	1,235	1,0
25-28/08	72	60,0	2,447	1,9
28-30/08	49	5,0	0,206	0,2
31/08-4/09	96	178	3,521	2,8

Volume écoulé: 19.200.000 m³
Lame écoulée: 15,2 mm

Pluie moyenne: 135 mm
Coef écoult: 11,26 %

Azel en 1982

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
27-28/05	9	103	0,944	0,69
3-5/06	55	92,4	3,061	2,25
4-6/08	53	49,3	1,577	1,15
6-7/08	25	344	1,917	1,41
7-9/08	45	74,2	1,324	0,97
9-12/08	64	54,1	0,840	0,62
12-13/08	13	61,5	0,818	0,60
13-14/08	39	69,0	1,997	1,47
14-18/08	93	26,8	1,081	0,79
18-19/08	13	29,2	0,508	0,37
19/08	14	14,9	0,349	0,26
19-23/08	72	25,2	1,091	0,80
23-25/08	55	25,2	1,414	1,04
25-29/08	96	55,8	2,580	1,90
29-30/08	32	1,94	0,097	0,07
31/08-4/09	92	170	3,631	2,67

Volume écoulé: 23.200.000 m³
Lame écoulée: 17,06 mm

Pluie moyenne: 140 mm
Coef écoult: 12,18 %

ANNEXE 3-A.I,11 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua 1982

Toudou (radiers Agadez) en 1982

Date	Q max (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)
27/05	188	1987	1,32
3/06	14,3	575	0,38
4/08	12,6	84	0,06
5/08	44,4	1665	1,11
6/08	302	1811	1,20
8/08	62	1103	0,73
9/08	150	1113	0,74
12/08	149	1497	0,99
13/08	65	1847	1,23
15/08	20,4	792	0,53
19/08	9,2	394	0,26
20/08	10,7	549	0,36
23/08	14,3	726	0,48
25/08	36	1505	1,00
31/08	195	4548	3,02

Volume écoulé: 20.200.000 m³
Lame écoulée: 13,4 mm

Pluie moyenne: 146 mm
Coef écoult: 9,18 %

Agassaghas en 1982

Date	Tm (mn)	Q max (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Ke (%)
22/05	15	0,05	0,16	~ 0	
27/05	60	40,5	110	19	
2/06	75	0,2	0,77	0,1	
2/07	10	0,2	0,06	~ 0	
4/08	55	3,5	7,88	1,4	12
6/08	20	0,7	1,42	0,2	3
7/08	150	0,9	8,42	1,5	34
9/08	50	13,8	43,7	7,5	34
12/08	60	7,7	35,8	6,2	33
14/08	110	1,9	21,9	3,8	48
31/08	80	51,3	162	27,9	69

Vomume écoulé: 392.000 m³
Lame écoulée: 68 mm

Pluie moyenne: 171
Coefficient d'écoulement: 39,8 %

Azamella en 1982

Date	Tm (mn)	Q max (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Ke (%)
27/05	30	93,5	344	5,6	
3/06	20	1,5	14	0,2	
4/08	75	14,6	68	1,1	10
6/08	120	96	489	8,0	43
8/08	35	21,3	178	2,9	48
9/08	80	108	801	13,1	48
12/08	90	101	751	12,3	58
14/08	5	1,1	23	0,4	
31/08	55	41,4	486	8,0	47

Vomume écoulé: 3.150.000 m³
Lame écoulée: 51,7 mm

Pluie moyenne: 147 mm
Coefficient d'écoulement: 35,2 %

ANNEXE 3-A.1,12 Caractéristiques des écoulements de la cuvette d'Agadez (Radiers, Agassaghas, Azamella) en 1982

Dabaga en 1983

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
19/07	12	3,00	0,082	0,08
27-28/07	23	4,20	0,214	0,20
1-3/08	53	204	3,275	3,15
4-5/08	24	165	1,901	1,83
5-6/08	24	62,6	2,341	2,25
6-7/08	24	140	1,970	1,89
7-8/08	32	94,0	2,928	2,82
27-29/08	40	38,7	1,637	1,57
15-16/09	30	11,6	0,296	0,29

Volume écoulé: 14.700.000 m3

Pluie moyenne: 76 mm

Lame écoulée: 14,1 mm

Coef écoul: 18,6 %

Razel en 1983

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
30/07	4	1,90	0,006	0,005
31/07	2	3,00	0,002	0,002
2-3/08	35	45,5	1,366	1,06
3-5/08	48	66,8	1,179	0,91
5-6/08	35	20,0	0,557	0,43
6-8/08	41	52,2	2,104	1,63
8-9/08	45	14,1	0,519	0,40
20-21/08	20	19,5	0,081	0,06
28-31/08	78	7,50	0,556	0,43

Volume écoulé: 6.300.000 m3

Pluie moyenne: 70,3 mm

Lame écoulée: 4,9 mm

Coef écoul: 6,97 %

Azel en 1983

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
19-20/07	11	0,87	0,017	0,013
23-24/07	10	0,31	0,012	0,009
2-3/08	31	15,8	0,421	0,310
3-4/08	20	7,78	0,220	0,162
5-6/08	39	27,4	1,528	1,12
6-8/08	42	52,9	2,504	1,84
8-10/08	51	21,3	0,656	0,482
20-21/08	22	11,9	0,171	0,126
27-28/08	18	11,3	0,083	0,061
28-30/08	32	3,42	0,124	0,091

Volume écoulé: 5.700.000 m3

Pluie moyenne: 69,8 mm

Lame écoulée: 4,2 mm

Coef écoul: 6,01 %

ANNEXE 3-A.I,13 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1983

Toudou (radiers Agadez) en 1983

Date	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)
23/07	4,42	38,8	0,03
30/07	14,4	170	0,11
1/08	2,56	35,9	0,02
2/08	6,82	376	0,25
3/08	6,17	188	0,13
5/08	23,1	991	0,66
6/08	4,42	41,6	0,03
7/08	38,9	1778	1,18
8/08	27,6	361	0,24
20/08	1,02	7,8	0,005
27/08	7,57	64,4	0,04

Volume écoulé: 4.100.000 m³

Pluie moyenne: 70 mm

Lame écoulée: 2,72 mm

Coef écou: 3,89 %

Agassaghas en 1983

Date	Tm (mn)	Q max (m3/s)	Ve (m3)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
18/07	30	0,15	643	0,11	8,6	1,3
21/07	20	0,05	232	0,04	2,7	1,5
23/07	30	0,50	1380	0,24	2,8	8,6
30/07	5	2,70	3960	0,69	13,7	5,0
6/08	5	0,80	1600	0,29	11,6	2,4
8/08	10	2,70	4130	0,72	6,9	10,4
27/08	20	0,09	211	0,04	4,1	0,9

Vomume écoulé: 12.200 m³

Pluie moyenne: 70,4

Lame écoulée: 2,1 mm

Coefficient d'écoulement: 2,98 %

Azamella en 1983

Date	Tm (mn)	Qmax (m3/s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm(mm)	Ke (%)
30/07	20	51,2	228	3,7	21,2	17,5
4/08	10	3,3	8,1	0,1	3,9	3,4
8/08	20	27,9	102	1,7	10,9	15,3
20/08	25	7,9	46,8	0,8	6,7	11,4
27/08	65	10,5	43,2	0,7	2,6	27,2

Vomume écoulé: 428.000 m³

Pluie moyenne: 70,6

Lame écoulée: 7 mm

Coefficient d'écoulement: 9,91 %

ANNEXE 3-A.1, 14 Caractéristiques des écoulements de la cuvette d'Agadez (Radiers, Agassaghas, Azamella) en 1983

Station	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e 10 ³ m3	L.e (mm)	P moy	Ke (%)
Dabaga 29/09	28	108	1560	1,5	13,2	11,4
Razel 29/09	21	96	1270	1,0	15,4	6,5
Azel 15/07	14	17,9	196	0,1	1,49	6,7
Azel 29/09	21	83,8	1060	0,8	11,52	6,9
Toudou 29-30/09	17	16,6	200	0,13	10,97	1,19
Agassagh 29/09	8	5	11,8	2,03	7,97	25,5
Azamella	0		0			

**ANNEXE 3-A.I,15 Caractéristiques des écoulements du Téloua
(ensemble des stations) en 1984**

Date	Station	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
26-27/06	Dabaga	13	50	0,171	0,16
	Razel				
	Azel	11	21,3	0,047	0,03
16-17/07	Dabaga	15	14,4	0,264	0,25
	Razel	26	97,5	1,041	0,81
	Azel	18	124	0,364	0,27
19-20/07	Dabaga	24	171	1,272	1,22
	Razel	24	73,5	1,014	0,79
	Azel	18	47,1	0,483	0,35
10-11/08	Dabaga	24	28,5	0,392	0,38
	Razel	17	17,6	0,383	0,30
	Azel	21	48,6	0,683	0,50
12-13/08	Dabaga	30	35,2	0,343	0,33
	Razel	23	5,70	0,166	0,13
	Azel	27	9,30	0,203	0,15
15-17/08	Dabaga	50	73,3	1,876	1,80
	Razel	48	14	0,147	0,11
	Azel	37	152	0,364	0,27
18-22/08	Dabaga	106	445	11,9	11,4
	Razel	140	224	8,22	6,37
	Azel	98	337	8,72	6,39

Station	Ve 10 ⁶ m 3	Le (mm)	Pmoy (mm)	Ke (%)
Dabaga	16,69	16,0	66,7	24,0
Razel	11,46	9,09	74,6	12,2
Azel	11,90	8,75	76,0	11,4

**ANNEXE 3-A.I,16 Caractéristiques des écoulements du
Haut Téloua en 1985**

Toudou (radiers Agadez) en 1985

Date	T.e (h)	Q max (m3/s)	V.e (10 ³ m3)	L.e (mm)
27/06	5	0,65	4,11	0,003
28/06	6	0,53	3,30	0,002
12/07	6	6,77	36	0,024
14/07	6	2,20	7,8	0,005
15/07	5,5	1,72	9,12	0,006
16/07	21	50,6	258	0,171
20/07	19,5	13,5	312	0,207
8/08	7	61,2	180	0,119
11/08	17,5	37,4	435	0,289
12/08	17	14	134	0,089
16/08	18,5	7,59	141	0,094
18/08	55	324	6900	4,58

Volume écoulé: 8.420.000 m3
Lame écoulée: 5,59 mm

Pluie moyenne: 75,3 mm
Coef écou: 7,42 %

Agassaghas en 1985

Date	Te (h)	Tm (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10.3 m3)	L.e (mm)
27/06	15	65	0,8	3,56	0,61
8/08	14	70	5,0	27,0	4,65
12/08	15	30	1,5	4,50	0,78
18/08	19	50	36	117	20,2

Vomume écoulé: 152.060 m3
Lame écoulée: 26,3 mm

Pluie moyenne: 65,3 mm
Coefficient d'écoulement: 40,3 %

Azamella en 1985

Date	Te (h)	Tm (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10.3 m3)	L.e (mm)
11-12/07	13	285	9,5	183	3,0
15/07	5	20	11,5	79,2	1,30
16/07	11	20	16	140	2,29
8/08	12	80	51	453	7,42
10/08	6	10	0,4	3,75	0,06
12/08	8	35	15	96,5	1,58
15/08	4	20	1,5	10,7	0,18
18/08	15	95	118	882	14,5

Vomume écoulé: 1.847.600 m3
Lame écoulée: 30,3 mm

Pluie moyenne: 73,6 mm
Coefficient d'écoulement: 41,2 %

ANNEXE 3-A.1, 17 Caractéristiques des écoulements de la cuvette d'Agadez (Radiers, Agassaghas, Azamella) en 1985

Dabaga en 1986

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
10-12/07	37	35	8,70	0,668	0,64
16-21/07	131	30	75,6	2,337	2,24
22-24/07	44	40	50,0	0,686	0,66
25-27/07	45	30	21,0	0,488	0,47
28-30/07	49	65	26,0	0,396	0,38
1-2/08	31	110	41,8	1,204	1,16
2-6/08	79	140	118	2,092	2,01
7-8/08	18	30	2,27	0,065	0,06
12-17/08	111	30	58,4	1,255	1,21
26-28/08	27	25	137	0,792	0,76
31/08-1/09	10	60	1,00	0,018	0,02
1-4/09	66	60	33,5	0,645	0,62
8-13/09	114	5	6,80	1,023	0,98
15-17/09	55	25	6,80	0,331	0,32
21-22/09	40	55	3,20	0,162	0,16

Volume écoulé: 12.700.000 m³
Lame écoulée: 12,2 mm

Pluie moyenne: 96 mm
Coef écoul: 12,71 %

Razel en 1986

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
16-18/07	48	180	13,5	0,730	0,57
19-21/07	50	180	13	0,778	0,60
22-25/07	27	130	52	1,462	1,13
25-28/07	27	150	73	1,303	1,01
28/07-1/08	73	300	12,5	0,460	0,36
1-5/08	106	150	35	2,133	1,65
10-13/08	58	35	23,5	0,685	0,53
13-16/08	83	300	19,5	1,720	1,33
26-30/08	64	180	21	1,080	0,84
9/09	9	25	215	2,383	1,85
19/09	5	50	6,3	0,045	0,04

Volume écoulé: 12.800.000 m³
Lame écoulée: 9,92 mm

Pluie moyenne: 113,3 mm
Coef écoul: 8,76 %

Azé en 1986

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	V.e (10 ⁶ m ³)	L.e (mm)
11/06	7	50	1,42	0,012	0,009
25/06	17	55	7,78	0,260	0,191
9/07	4	80	1,70	0,011	0,008
17/07	28	90	11,3	0,390	0,287
19/07	26	75	7,78	0,332	0,244
22/07	25	12	51,5	0,936	0,688
25/07	23	200	110	1,212	0,891
29/07	23	117	11,3	0,338	0,249
31/07	9	42	3,42	0,321	0,236
2/08	25	70	6,64	0,173	0,127
3/08	43	70	31,5	1,423	1,046
10/08	32	10	17,2	0,510	0,375
13/08	55	140	17,2	1,013	0,745
18/08	3	20	2,16	0,001	0,001
26/08	30	90	11,3	0,453	0,333
31/08	18	120	31,5	0,478	0,351
2/09	27	85	13,4	0,445	0,327
5/09	9	45	5	0,065	0,048
9/09	20	105	140	1,332	0,979
10/09	70	480	24,4	1,593	1,171
13/09	15	160	4,2	0,056	0,041
15/09	23	130	4,7	0,173	0,127
20/09	27	17	77,6	1,012	0,744

Volume écoulé: 12.250.000 m³
Lame écoulée: 9,0 mm

Pluie moyenne: 114,9 mm
Coef écoul: 7,83 %

ANNEXE 3-A.1,18 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1986

Toudou (radiers) en 1986

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
11/06	5	5	5,0	0,034	0,02
25/06	7	20	4,65	0,097	0,06
16/07	2	5	4,70	0,025	0,02
17/07	28	5	11,2	0,272	0,18
18/07	9	5	1,40	0,024	0,02
19/07	29	85	5,52	0,218	0,15
20/07	7	70	2,30	0,031	0,02
22/07	24	10	7,08	0,192	0,13
23/07	16	5	17,4	0,270	0,18
25-26/07	22	30	66,5	1,273	0,85
29/07	11	15	4,45	0,089	0,06
1/08	1	20	1,00	0,004	- 0
2/08	10	210	2,40	0,051	0,03
3/08	41	10	22,6	1,087	0,72
10/08	7	80	11,7	0,111	0,07
11/08	14	90	10,6	0,256	0,17
13-14/08	23	90	14,7	0,663	0,44
15/08	7	80	3,0	0,039	0,03
27/08	13	15	8,5	0,216	0,14
31/08-1/09	16	10	23,4	0,440	0,29
2/09	20	75	10,4	0,342	0,23
5/09	7	20	5,60	0,046	0,03
9-10/09	16	15	60,2	1,852	1,23
10-11/09	48	455	16,5	0,755	0,50
20-21/09	17	15	80,4	1,244	0,83

Volume écoulé: 9.631.000 m3

Pluie moyenne: 106,5mm

Lame écoulée: 6,40 mm

Coef écoul: 6,0 %

Agassaghas en 1986

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
11/06	125	5	10,8	22,8	3,93
16/07	130	13	4,24	8,7	1,5
18/07	35	1	0,06	0,078	0,01
25/07	107	37	16	35,4	6,1
1/08	130	50	7,82	19,2	3,31
10/08	60	20	0,5	0,6	0,10
31/08	100	10	2,12	5,22	0,90
5/09	190	22	2,12	4,1	0,71
9/09	60	2	10,1	5,4	0,93

Volume écoulé: 101.000 m3

Pluie moyenne: 110 mm

Lame écoulée: 17,5 mm

Coef écoul: 15,91 %

Azamella en 1986

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
11/06	140	33	15,4	38,2	0,626
16/07	130	37	5,30	14,4	0,236
26/07	400	90	38,2	335	5,49
1/08	220	70	8,80	30,6	0,502
10/08	140	30	5,30	11,9	0,195
21/08	160	5	1,78	9,1	0,149
31/08	400	40	43	193	3,16
5/09	240	40	15,6	93,6	1,53
9/09	45	5	25,4	134	2,20
20/09	450	20	144	405	6,64

Volume écoulé: 1.270.000 m3

Pluie moyenne: 98 mm

Lame écoulée: 20,73 mm

Coef écoul: 21,15 %

ANNEXE 3-A.I,19 Caractéristiques des écoulements du Téloua (cuvette d'Agadez) en 1986

Dabaga en 1987

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
25-26/07	41	122	84,9	1,860	1,79
31/07	11	30	75,6	0,682	0,66
20/08	29	360	15,5	0,609	0,58
23-24/08	38	25	91,7	1,175	1,13
26/08	12	150	31	0,444	0,43

Volume écoulé: 4.770.000 m³

Pluie moyenne: 59,7 mm

Lame écoulée: 4,60 mm

Coef écoult: 7,71 %

Azel en 1987

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
18/07	2	2	0,645	1,85	- 0
19/07	20	8	74	820	0,603
20/07	9	74	5,11	89	0,065
26/07	15	75	9,50	301	0,221
27/07	2	26	0,300	0,866	- 0
27/07	8	46	6,67	66,1	0,049
30/07	13	125	6,33	54,1	0,040
1/08	9	88	5,11	90,2	0,066
7/08	2,5	1	1,95	5,73	0,004
22/08	3,5	4	2,20	8,30	0,006
23-24/08	37	6	28,3	896	0,659
26/08	3	9	1,75	4,64	0,003
26/08	4	10	0,450	3,60	0,003
27/08	14	59	17	408	0,300

Volume écoulé: 2.749.000 m³

Pluie moyenne: 56,4 mm

Lame écoulée: 2,32 mm

Coef écoult: 4,11 %

Azamella en 1987

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
7/08	148	13	1,39	2,73	0,045
16/08	36	6	0,042	0,049	0,001
22/08	93	23	1,24	2,024	0,033
26/08	178	10	1,55	6,20	0,102

Volume écoulé: 11.000 m³

Pluie moyenne: 26 mm

Lame écoulée: 0,181 mm

Coef écoult: 0,70 %

Agassaghas en 1987

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (m3)	L.e (mm)
7/08	32	22	0,023	27	0,005
16/08	64	19	0,130	197	0,034
22/08	48	22	0,041	79	0,014
23/08	326	13	0,750	3578	0,617
26/08	301	46	0,857	2938	0,507
27/08	240	11	0,560	1470	0,253

Volume écoulé: 8289 m³

Pluie moyenne: 30 mm.

Lame écoulée: 1,43 mm

Coef écoult: 4,77 %

Toudou (radiers) en 1987

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
19/07	22	5	28,1	654	0,434
20/07	6,5	16	2,75	30,5	0,020
26/07	11	90	4,68	91,8	0,061
28/07	3,5	5	1,36	6,61	0,004
31/07	2,5	40	0,200	0,78	0,001
1/08	6	37	0,770	7,10	0,005
23/08	16	133	21,7	724	0,480
26/08	2,5	20	1,40	6,03	0,004
27/08	14	65	12,6	351	0,233

Volume écoulé: 1872 m³

Pluie moyenne: 40,9 mm

Lame écoulée: 1,24 mm

Coef écoult: 3,03 %

ANNEXE 3-A.I,20 Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1987

Dabaga en 1988

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
6-7/06	25	145	140	1,690	1,62
7-8/06	27	130	86	1,066	1,02
10-12/07	28	95	25	0,667	0,64
13-14/07	18	50	94	1,336	1,28
14-15/07	24	140	241	1,840	1,77
21-24/07	53	1605	45	1,278	1,23
25-26/07	57	150	290	4,295	4,12
16-17/08	37	75	275	4,874	4,68
23-24/08	18	35	102	0,947	0,91
29/08	9	40	38	0,304	0,29

Volume écoulé: 18.297.000 m³
Lame écoulée: 17,56 mm

Pluie moyenne: 168 mm
Coef écou: 10,45 %

Acharak en 1988

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)
6-8/06			22,4	65	29,5
3/07	2h40	43	8,37	10,85	4,93
6/07	3h	11	0,50	1,11	0,51
14-15/07	6h25	26	21,6	64,8	29,5
17/07	3h08	5	3,80	5,89	2,67
22-23/07	6h50	182	3,36	7,12	3,24
13/08	2h30	10	0,50	1,00	0,45
13-14/08	3h45	37	1,60	3,78	1,72
16/08	3h30	48	0,97	2,75	1,25
23/08	4h33	36	13,8	21,6	9,82
24/08	2h20	32	11,5	20,5	9,32
26/08	5h20	65	1,29	3,17	1,44
29/08	4h	6	1,60	3,84	1,75
8/09	4h55	41	6,27	13,7	6,23

Volume écoulé: 225.000 m³
Lame écoulée: 102,3 mm

Pluie moyenne: 230 mm
Coef écou: 44,47 %

Azel, principales crues en 1988

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
7-8/06	31	119	213	2,90	2,13
10-11/07	36	17	44	0,81	0,60
14-15/07	37	208	360	5,50	4,04
25-27/07	41	226	393	8,00	5,88
16-18/08	45	61	425	9,43	6,93
23-25/08	71	31	213	7,16	5,27
5-7/09	48	108	26,5	0,73	0,54

Volume écoulé: 48.640.000 m³
Lame écoulée: 35,7 mm

Pluie moyenne: 176 mm
Coef écou: 20,3 %

ANNEXE 3-A.I,21 Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1988

Toudou en 1988

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
6-9/06	63	83	153	2,479	1,65
14-16/07	69	174	315	6,190	4,11
19-20/07	41	308	100	0,975	0,65
22-24/07	62	80	25,5	1,623	1,08
25-28/07	66	144	336	6,848	4,54
16-20/08	98	84	334	9,202	6,11
23-31/08	198	120	254	10,507	6,97
2-4/09	58	370	18,3	1,113	0,74
5-7/09	39	47	17,1	0,717	0,48
9/09	15	45	3,2	0,076	0,05

Volume écoulé: 39.730.000 m3

Pluie moyenne: 155,6 mm

Lame écoulée: 26,38 mm

Coef écou: 16,95 %

Agassaghas en 1988

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
10/07	2h05	15	9,7	16,1	2,78
14/07	1h54	5	10,6	33,5	5,78
19/07	3h14	36	17,6	87,2	15,03
25/07	2h03	18	7,2	13,3	2,29
23/08	3h52	67	14,7	56,2	9,69
24/08	8h30	56	40,7	170	29,3

Volume écoulé: 398.000 m3

Pluie moyenne: 176 mm

Lame écoulée: 64,87 mm

Coef écou: 37 %

Azamella en 1988

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
6-7/06	9h30	70	13,6	135	2,21
7-8/06	16h15	30	38,6	481	7,89
10/07	4h40	50	25,5	122	2,00
12-13/07	8h	9	20	140	2,30
14-15/07	11h20	94	69,5	566	9,28
19-20/07	6h	38	68,3	224	3,67
25/07	7h20	48	78	386	6,33
23/08	10h50	72	57	431	7,07
24/08	11h	62	124	1020	16,7

Volume écoulé: 3.838.000 m3

Pluie moyenne: 168 mm

Lame écoulée: 57,45 mm

Coef écou: 34,2 %

ANNEXE 3-A.I,22 Caractéristiques des écoulements du Téloua
(cuvette d'Agadez) en 1988

Azel en 1989

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ⁶ m3)	L.e (mm)
25/06	1,5	3	3,80	0,006	0,004
29/07	1	7	2,02	0,002	0,001
2-3/08	9	110	14,4	0,147	0,108
7/08	6	35	28,4	0,184	0,135
10-11/08	48	80	32,8	1,017	0,748
13-15/08	49	128	22,3	1,024	0,753
16-19/08	68	15	55,8	2,332	1,715
22-24/08	47	62	47,1	2,457	1,807
26-29/08	81	77	21,3	1,325	0,974
8-10/09	62	61	12,4	0,694	0,510

Volume écoulé: 9.190.000 m3

Pluie moyenne: 99,4 mm

Lame écoulée: 6,76 mm

Coef écou: 6,80 %

Toudou (radiers) en 1989

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
2-3/08	12	65	24,2	266	0,152
7-8/08	9	92	52,7	336	0,223
10-11/08	32	50	35,8	989	0,656
13-14/08	28	10	15,3	448	0,297
17-19/08	50	20	30	1694	1,12
22-24/08	51	404	36	2365	1,57
25-29/08	85	140	59,8	1464	0,971
8-9/09	22	92	14,1	321	0,213

Volume écoulé: 7.883.000 m3

Pluie moyenne: 132 mm

Lame écoulée: 5,20 mm

Coef écou: 3,94 %

Agassaghas en 1989

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
2-3/08	3h50	60	4,08	11,97	2,06
8/08	5h50	43	22,8	53,57	9,24
10/08	3h50	13	4,32	6,69	1,15
22/08	4h	27	3,84	7,40	1,28
28/08	3h	23	33,3	118	20,3
8-9/09	10h20	68	0,064	1,21	0,21

Volume écoulé: 197.200 m3

Pluie moyenne: 130 mm

Lame écoulée: 34,2 mm

Coef écou: 26,3 %

Azamella en 1989

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	Ve (10 ³ m3)	L.e (mm)
14/07	2h25	20	0,80	3,71	0,06
2-3/08	7h10	90	85	595	9,75
7/08	3h30	29	56,5	177	2,90
10-11/08	6h40	28	69,3	291	4,77
18-19/08	5h20	66	1,24	4,33	0,07
22/08	8h10	15	95	391	6,41
28/08	6h25	44	69,3	275	4,51
8/09	6h10	17	2,56	20,3	0,33

Volume écoulé: 1.770.00 m3

Pluie moyenne: 119 mm

Lame écoulée: 28,8 mm

Coef écou: 24,2 %

**ANNEXE 3-A.I,23 Caractéristiques des écoulements du Téloua
(ensemble du bassin) en 1989**

Date	T.e (h)	T.m (mn)	Q max (m3/s)	V.e (10 ³ m3)	L.e (mm)
12-13/07	2	2	3,20	9,780	0,007
13-14/07	9	22	3,86	36,45	0,027
14-15/07	16	37	34,1	230	0,169
19-20/07	13	10	5,38	38,55	0,028
23/07	21	175	13,2	391,8	0,288
24-25/07	41	20	227	3079,5	2,27
28-29/07	15	50	31	605,4	0,445
29-31/07	56	70	22,2	1378,8	1,014
31/07-3/08	71	80	179	2100,6	1,55
3-6/08	68	170	65,6	1079	0,793
8-9/08	33	11	175	1100	0,809
10-12/08	50	140	11,5	525,8	0,387
13-14/08	21	220	11,5	224,4	0,165
14-15/08	19	55	17,7	173,1	0,127
15-16/08	12	5	0,19	2,88	0,002
20/08	21	115	0,54	16,41	0,012
1/09	10	60	0,37	4,83	0,004
6/09	3	21	0,45	17,10	0,013

Volume écoulé: 11.000.000 m3
Lame écoulée: 8,11 mm

Pluie moyenne: 87,8 mm
Coef écou: 9,24 %

ANNEXE 3-A.I,24 Caractéristiques des écoulements du Téloua à Azel en 1990

Téloues à S1

Date	Te(h)	Tm(mn)	Qmax(m³/s)	Ve(10³m³)	Pm(mm)	Le(mm)	Ke(%)
2/08	3	40	24	63	6,8	0,19	2,79
4/08	12	70	320	2390	39,9	7,38	18,5
7/08	7	45	28	306	9,2	0,94	10,2
14/08	8	45	54	666	22,2	2,06	9,28
20/08					4,9		
26/08	6	60	20	228	8,3	0,70	8,43
1/09	1				16,2		
9/09	9	40	38	450	6,7	1,39	20,7

Volume écoulé: 4.100.000 m3
Lee: 12,66 mm

Pluie moyenne: 119 mm
Ke: 10,63 %

Nabarou à S2

Date	Te(h)	Tm(mn)	Qmax(m³/s)	Ve(10³m³)	Pm(mm)	Le(mm)	Ke(%)
2/08	5	25	19,6	128	19,0	0,53	2,79
4/08	7	90	165	1850	36,3	7,58	20,9
7/08					0,1		
14/08	10	180	29,6	420	25,7	1,72	6,69
20/08	1	15	0,80	2,7	5,6	0,01	0,18
26/08	2	35	8,90	31,2	6,8	0,13	1,91
1/09	3	40	2,10	12,3	10,8	0,05	0,46
9/09	8	90	8,0	110	11,2	0,45	4,02

Volume écoulé: 2.550.000 m3
Lee: 10,47 mm

Pluie moyenne: 120,8 mm
Ke: 8,67 %

Akrereb à S3

Date	Te(h)	Tm(mn)	Qmax(m³/s)	Ve(10³m³)	Pm(mm)	Le(mm)	Ke(%)
2/08	4				3,1		
4/08	3,5	30	270	780	33,8	29,5	87,3
7/08	3,7	60	26	118	11,6	4,47	38,5
14/08		85	13,8	68,4	18,4	2,59	14,1
20/08	3				2,2		
26/08		15	10,5	47	12,9	1,78	13,8
1/09	1,5				11,9		
9/09		45	1,60	0,004	6,0	- 0	0

Volume écoulé: 1.010.000 m3
Lee: 38,3 mm

Pluie moyenne: 102,8 mm
Ke: 37,3 %

ANNEXE 3-A.I,25 Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1977

Date	Te(h)	Tm(mn)	Qmax(m³/s)	Ve(10³m³)	Pm(mm)	Le(mm)	Ke(%)
29/07	3,5	15	4,52	27,6	5,8	0,085	1,47
30/07	2,8	5	11,0	30,4			
31/07	5	15	7,80	39,2	15,2	0,475	3,13
31/07	4	50	13,4	84,4			
Date	Te(h)	Tm(mn)	Qmax(m³/s)	Ve(10³m³)	Pm(mm)	Le(mm)	Ke(%)
27/07	4,8	55	12,4	12,0	17,8	0,050	0,28
29/07	7	50	6,55	52,8	8,4	0,216	2,57
31/07	24	610	39	779	11,4	3,19	28
Date	Te(h)	Tm(mn)	Qmax(m³/s)	Ve(10³m³)	Pm(mm)	Le(mm)	Ke(%)
30/07	10	15	32	120		4,55	
31/07	12	5	13,8	90	29,5	3,41	27,0
28/08	2	55	0,80	6,37	1,5	0,241	16,1

Bilan annuel 1978	Téloues S1	Nabarou S2	Akrereb S3
Pluie moyenne (mm)	47,9	63,5	48,3
Débit max (m3/s)	13,4	39	32
Vol. écoulé (10.3 m3)	172	951	216
Lame écoulée (mm)	0,56	3,46	8,20
Coef. d'écoul. (%)	2,67	9,19	26,5

ANNEXE 3-A.I,26 Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1978

Téloues S1	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
24/07	11	270	17,8	351	11,7	1,08	9,23
6/08	6,5	20	3,35	10,4	2,2	0,032	1,45
21/08	11	15	27,8	111	2,7	0,34	12,6
Nabarou S2	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
6/08	10	5	5,0	30,8	7,3	0,126	1,73
16/08	7	30	9,4	71,3	2,2	0,292	13,3
20/08	8,5	25	7,0	69,6	5,9	0,285	4,83
21/08	11	30	22,2	225	3,5	0,922	26,3
Akrereb S3	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
2/06	1,5		1,6	43		1,63	
20/08	3,5		1,9	6,8		0,26	

Bilan annuel 1979	Téloues S1	Nabarou S2	Akrereb S3
Pluie moyenne (mm)	16,6	18,9	
Débit max (m ³ /s)	27,8	22,2	1,9
Vol. écoulé (10.3 m ³)	472	397	49,8
Lame écoulée (mm)	1,45	1,63	1,89
Coef. d'écoul. (%)	8,73	8,62	

ANNEXE 3-A.I,27 Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1979

Téloues S1	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
28/06	5	8,6	37		0,114	
3-4/07	9	23,8	197	13,8	0,608	4,40
14/07	2,5	19,3	108	1,6	0,333	20,8
19/07	10	99,8	324	6,3	1,00	15,9
21/07	5	64,1	147	3,5	0,454	13,0
31/07	2	16,6	36	3,7	0,111	3,00
17/08	16	93,5	1329	26,3	4,10	15,6
25/08	1,5	3,4	10	7,6	0,031	0,41
30/08	5	7,2	59	1,2	0,182	15,2
2/09	4,5	9,5	42	2,4	0,130	5,42
Nabarou S2	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
25/05	6	1,5	14		0,060	
26/05	14,5	11,3	186		0,762	
28/05	35	91	2680		11,0	
3-4/07	24	24,9	945	14,1	3,87	27,4
14/07	4,5	14,5	70	3,3	0,287	8,69
18/07	9	10	59	4,4	0,242	5,50
19/07	2	8	22	3,3	0,090	2,72
21/07	4	8	39	4,2	0,160	3,81
19/08	14,5	29,7	271	25,9	1,11	4,29
24-25/08	17	32,5	467	11,5	1,91	16,6
30/08	13	29,7	415	5,5	1,70	30,9
Akrereb S3	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
28/05	3,5	1,95	5,8		0,220	
28/06	6	16,1	46,2	15,1	1,75	13,0
4/07	5	0,85	3,4	2,6	0,130	5,00
19/07	3	6,70	19	8,8	0,720	8,18
21/07	1	0,35	0,8	1,6	0,030	1,88
14/08	5	1,50	10,6	3,8	0,402	10,6
17/08	13	48,7	293	24,9	11,1	44,6
25/08	4,5	13,0	75,4	8,0	2,86	35,8
2/09	3	3,37	13,6	7,4	0,515	6,96

Bilan annuel 1980	Téloues S1	Nabarou S2	Akrereb S3
Pluie moyenne (mm)	70	(>72)	75
Débit max (m ³ /s)	99,8	91	48,7
Vol. écoulé (10.3 m ³)	2289	5168	468
Lame écoulée (mm)	7,06	21,2	17,7
Coef. d'écoul. (%)	10,1	< 29	23,6

ANNEXE 3-A.I,28 Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1980

S1 (1975)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
8/07	10	40	0,5	6	0,01		(12)
25/07	10	41	142	1710	2,76		(12)
28/08	20		119	1120	1,81		(6)
29/08	60	55	16,4	82	0,13		(5)
S1 (1976)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
17/06	15	17	29,6	365	0,59		
18/06	60	40	22,0	378	0,61	(7,0)	(17)
22/07	30	9	1,58	6	0,01	5,2	0,2
5/08	20	19	2,65	57	0,1		
6/08	15	40	56,9	432	0,70	3,0	27
11/08	65	26	320	1545	2,49		
12/08	25	31	145	1347	2,17	18,8	25
10/09	70	41	650	4477	7,22	22,6	32
S1 (1977)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
4/08	30	20	1382	(2840)	(4,58)	8,5	(54)
23/08	20	5	0,69	15	0,02		
24/08	150	30	67,8	912	1,47	4,9	31
1/09	450	(30)	1,43	47	0,08	7,4	1,4
10/09	60	(15)	65,0	504	0,81		
11/09	60	(6)	4,38	54	0,09	23,3	14
12/09	150	48	113	1480	2,39		
S1 (1978)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
25/04			138	(1500)	(2,4)	(5,9)	(41)
4/06			54,2	(500)	(0,8)	(7,9)	(10)
31/07	240	34	2,67	2070	3,34	9,8	(34)
10/09	60	18	2,44	68	0,11		
11/09	105	30	73,4	514	0,83	8,7	12
12/09	10	19	5,48	36	0,06		
15/09	20	43	12,3	257	0,41	5,8	7
S1 (1979)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
7/06	25	11	0,69	11	0,02		
17/06	60	(27)	27,9	592	0,95		
19/06							
22/06							
23/06	10	21	77,6	1120	1,81	24,3	(26)
24/06	12	46	92,9	1030	1,66		
7/07	80	62	8,71	239	0,39		
24/07	50	30	8,71	92	0,15		
5/08	20	47	4,60	142	0,23	1,0	20
16/08	5	19	40,8	550	0,89	9,4	10
S1 (1980)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
29/05		14	1,60	30	0,05		
29-31/05		32	5,70	167	0,27		
5-6/06		10	5,30	46	0,07		
10-12/06		43	65,0	527	0,85	9,5	11
28-29/06		25	10,0	124	0,20		
1-3/07		33	187	1824	2,94		
3-4/07		39	101	606	0,98	25,3	23
5-6/07		28	10,0	316	0,51		
6-8/07		45	56,9	769	1,24		
18-19/07		23	238	2061	3,32		
19-21/07		50	88,2	1024	1,65		
21-22/07		15	0,90	17	0,03	32,9	29
22-23/07		22	174	2311	3,73		
23-24/07		33	25,2	430	0,69		
31/7-2/08		45	232	2740	4,42		
4-6/08		56	46,2	684	1,10	16,2	34
18-19/08		31	0,70	34	0,05		
19-20/08		19	9,10	152	0,25	22,6	(51)
20-22/08		45	1520	(7000)	(11,3)		
25-26/08		(20)	(5,70)	(133)	(0,21)		
26-27/08		45	4,60	148	0,24		
30/8-1/09		48	58,3	810	1,31	20,5	(9)
1-2/09		31	0,60	30	0,05		
2-4/09		34	2,80	78	0,13		
3-5/09		44	35,2	875	1,41	(8,0)	(18)

ANNEXE 3-A.I,29 Caractéristiques des écoulements Tamgak S1 (1975-1980)

S2 (1975)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
8/07	30	4	1,00	2,5	0,003	0,42	7
25/07							
28/08							
29/08	30	4,5	10,5	24,8	0,029	0,41	7
S2 (1976)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
16/06	35	11	27,2	346	0,41	(17)	(2,4)
31/07	30	8,5	29,3	136	0,16	11,2	1,4
6/08	20	8	2,30	18,7	0,02	1,20	1,7
11/08	55	5,5	6,00	28,5	0,03		
11/08	115	14	13,5	172	0,20		
12/08	20	2,5	3,20	7,8	0,01	20,9	3,9
12/08	190	19	27,2	487	0,58		
10/09	200	16	24,2	223	0,26	9,1	2,9
S2 (1977)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
4/08	10	1	3,80	4,95	0,006	7,0	0,09
17/08	20	4	0,25	1,85	0,002	7,5	0,03
23/08	40	4	0,25	1,99	0,002	2,5	0,08
24/08	210	10,5	26,0	350	0,41	3,7	11,1
11/09	140	11	0,55	9,90	0,01		
12/09	80	8	0,35	6,66	0,008	11,4	0,16
S2 (1978)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
25/04			28,2	(300)	0,36	(5,9)	(6,1)
10/09	35	7	3,51	30	0,036	2,9	1,24
11/09	5	10	2,36	47,5	0,056	2,7	2,07
S2 (1979)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
29/05	5	9	0,21	3,47	0,004		
24/06	15	2,5	9,50	50,4	0,06		
25/06	120	11	2,00	33,6	0,04	28,7	0,45
24/07	5	5	4,40	28,8	0,03		
9/09	5	9	7,50	115	0,14	2,5	5,6
S2 (1980)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
28-29/05		18	9,8	172	0,20		
7/06		10	2,4	42	0,05		
11/06		3	0,7	4	0,01	25	1,64
1/07		13	3,1	76	0,09		
7/07		9	0,9	14	0,02		
7-8/07		14	1,4	38	0,04		
18-19/07		13	188	(1587)	(1,88)		
19-20/07		7	1,5	20	0,02	6,4	29,7
21-22/07		20	(117)	(1006)	(1,19)		
23-24/07		25	2,9	70	0,08	15,9	7,99
31/7-1/08		13	(135)	(1230)	(1,46)		
17/08		17	23,5	323	0,38	13,5	13,6
17-18/08		12	12	116	0,14		
18-19/08		17	(3,2)				
19/08		5				28,7	3,80
20/08		11	18,2	252	0,30		
20-21/08		19	(76,5)	(553)	0,65		
1-2/09		15	9,4	89	0,11	13,3	0,83

ANNEXE 3-A.I,30 Caractéristiques des écoulements Iberkoum S2 (1975-1980)

S3 (1975)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
8/07							
25/07	20	26	61,2	782	0,50	6,25	8,0
28/08	20	17	44,8	546	0,35	7,0	5,0
29/08	50	13,5	20,4	170	0,11	1,83	6,0
S3 (1976)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
16/06	10	11	33,0	190	0,12		
17/06	20	18	18,5	179	0,12	7,0	4,6
18/06	20	12	18,5	120	0,08		
31/07	5	14	21,2	92,1	0,06	7,1	0,85
6/08	10	17,5	18,5	211	0,14	2,0	7,0
11/08	15	27,5	80,0	1100	0,7		
12/08	20	22	43,0	1130	0,7	20,0	7,0
10/09	20	32	110	2670	1,7	15,2	11,2
S3 (1977)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
4/08	150	24	89,0	1960	1,26	8,7	14,5
24/08	140	25	55,0	1100	0,710	5,2	13,7
10/09	10	16	18,5	69,0	0,045		
11/09	60	6	5,5	13,2	0,008	15,7	1,10
12/09	30	24	45,0	184	0,119		
S3 (1978)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
31/07	5	50	73,0	1178	0,76	7,6	10,0
11/09	25	12	28,0	296	0,19	5,2	3,65
15/09	5	32	13,2	518	0,33	3,9	8,46
S3 (1979)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
19/06	10	30	15,7	683	0,44		
23/06	30	26	10,0	356	0,23		
24/06	80	20	33,0	634	0,41	26,9	6,08
25/06	30	36	28,0	803	0,52		
24/07	40	5	2,80	54,8	0,035		
16/08	10	24	10,0	282	0,18	9,9	1,82
S3 (1980)	Tm (mn)	Te (h)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m3)	Le (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
1/07			26,6	(420)	0,27	28,5	0,94
18-19/07		17	74,4	(1250)	0,81		
19-20/07		14	39,6	630	0,41		
21-22/07		9	54,4	671	0,43	25,9	11,8
22-23/07		22	76,3	1597	1,03		
23-24/07		9	12,9	174	0,11		
31/7-1/08		18	97,4	2000	1,29		
4/08		5	13,0	136	0,09	13,7	10,1
17/08		7	62,3	472	0,30		
18/08		8	4,9	81	0,05		
19-20/08		10	26,5	246	0,16	24,6	16,7
20-?/08		(30)	(490)	(5600)	3,61		
1-2/09		14	13,0	200	0,13	16,8	0,83
3/09		14	0,60	12	0,01		
4/10		20	2,70	120	0,08	(6,0)	1,33

ANNEXE 3-A.I,31 Caractéristiques des écoulements Iférouane S3 (1975-1980)

IFEROUANE

BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
TAMGAK BV 1 S: 620 km ²	1975	142	2918	4,71	(22)	(21,4)
	1976	650	8607	13,9	56,6	24,6
	1977	1382	5852	9,44	44,1	21,4
	1978	138	4945	7,95	38,1	20,9
	1979	93	3776	6,10	(59,2)	(10,3)
	1980	1520	22936	37,0	135	27,4
	Moyenne	75.80	654	8172	13,2	59,2	21
BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
IBERKOUM BV 2 S: 845 km ²	1975	10,5	27,3	0,032	(22)	0,15
	1976	29,3	1419	1,67	59,4	2,81
	1977	26,0	375	0,438	32,1	1,36
	1978	28,2	378	0,452	(24,7)	1,83
	1979	9,50	231	0,274	(54,5)	0,50
	1980	188	5592	6,62	102,8	6,44
	Moyenne	75.80	48,6	1337	1,58	49,3	2,18
BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
IFEROUANE BV 3 S: 1550 km ²	1975	61,2	1498	0,96	15,1	6,36
	1976	110	5692	3,62	51,3	7,06
	1977	89	3326	2,14	29,6	7,23
	1978	73	1992	1,28	16,7	7,66
	1979	33	2813	1,82	36,8	4,95
	1980	490	13609	8,78	116	7,57
	Moyenne	75.80	143	4822	3,10	44,2	6,81

ANNEXE 3-A.I.32 Caractéristiques des écoulements sur les BV d'Iférouane, bilan des années 1975 à 1980

TIMIA

BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
TIMIA BV 1 S: 40,3 km ²	1976	292	2124	52,7	85	62
	1977	185	1330	33,0	107	31
	1978	78,2	674	16,7	104	16
	1979	251	639	15,9	106	15
	1980	205	740	18,3	102	18
	1981	49,4	720	17,9	65	28
	Moyenne	75-81	177	1038	25,8	95	28,3
BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
BV 2 S: 7,1 km ²	1976	10,6	43,5	6,1	81,4	7,5
	1977	36,5	48,4	6,8	82,3	8,3
BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
BV 3 S: 63,8	1976	32,8	117	1,8	69	2,6
BASSIN	Année	Qmax (m ³ /s)	Ve (10 ³ m ³)	L.e (mm)	Pm (mm)	Ke (%)
BV 4 S: 156 km ²	1976	35,5	458	2,9	69,1	4,2
	1977	127	446	2,9	66,9	4,3

ANNEXE 3-A.I.33 Caractéristiques des écoulements sur les BV de Timia, bilan des années 1976 à 1981

Timia 1	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
15/06	4 h 08	8	94,5	(170)	16	4,20	
16/06	10 h 41	11	292	(1300)		32,4	
22/07	10 h 10	32	19,1	86,4	11,6	2,15	18,5
31/07	6 h 09	14	5,50	26,0	10,4	0,65	6,25
5/08	7 h 48	24	42,2	137	9,8	3,40	34,7
11/08	11 h 55	79	89,0	318	22,9	7,90	34,5
12/08	7 h 19	19	2,24	12,5	8,1	0,30	3,70
12/10	8 h	45	7,30	37,5		0,93	
21/10	6 h 20	18	7,30	33,7		0,84	
Timia 2	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
22/07	1 h 15	10	0,25	0,33	8,5	0,05	0,58
5/08	0 h 50	5	0,18	0,16	6,4	0,02	0,31
11/08	3 h 30	45	10,6	28,2	24	3,9	16,3
Timia 3	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
5/08	1 h 10	10	0,45	1,29	9,4	0,02	0,21
11/08	1 h 11	18	1,3	1,73	9,7	0,03	0,31
12/08	4 h 14	24	2,9	16,6	14,9	0,26	1,75
10/09	4 h	28	32,8	97,8	26,9	1,53	5,69
Timia 4	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
16/06							
11/08	1 h 20	210	35,5	81,0	16,6	0,5	3,01
10/09	1 h 51	11	13,6	27,2	14,5	0,2	1,38

ANNEXE 3-A.I,34 Caractéristiques des écoulements des BV de Timia en 1976

Timia 1	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
20/08	2 h 40	20	12,0	27,8	6,8	0,7	10,3
26/08	4 h 23	16	12,0	23	12,1	0,6	4,95
1/09	5 h	14	6,10	20,4	10,3	0,5	4,85
8/09	0 h 25	2	0,35	2,74	3,5	0,07	2,00
9/09	5 h 23	70	185	914	28,1	22,7	80,8
10/09	3 h 28	35	163	338	21,1	8,4	39,8
Timia 2	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
20/08	0 h 32	5	2,85	2,56	13,8	0,4	2,90
9/09	1 h 20	5	8,55	5,16	13,8	0,7	5,10
10/09	1 h	12	36,5	40,7	17,3	5,7	32,9
Timia 4	Te (h)	Tm(mn)	Qmax(m ³ /s)	Ve(10 ³ m ³)	Pm(mm)	L.e(mm)	Ke(%)
20/08			5,8	7,29	5,4	0,047	0,87
1/09	0 h 48	2	1,35	1,21	6,5	0,008	0,12
9/09	2 h 15	5	127	295	9,8	1,89	19,3
10/09	1 h 27	7	57,5	106	9,7	0,68	7,01
14/09	1 h 35	8	13,4	37,3	7,6	0,24	3,16

ANNEXE 3-A.I,35 Caractéristiques des écoulements des BV de Timia en 1977

TIMIA BV 1 1978

Date	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
19/07	3 h 30	25	16,6	24,9	5,1	0,62	12,2
28/07	7 h 20	70	66,0	296	34,6	7,34	21,2
30/07	1 h	5	0,75	1,50		0,04	
31/07	2 h 40	10	3,39	13,2	15,3	0,33	8,43
1/08	3 h 25	15	11,8	36,9		0,92	
10/08	5 h 15	5	3,39	17,4	8,0	0,43	5,38
12/08	2 h 05	5	1,05	3,66	6,9	0,09	1,30
11/08	2 h 10	5	0,45	0,075	7,2	0,002	0,028
12/09	4 h 40	15	78,2	280	25,8	6,95	26,9

TIMIA BV 1 1979

Date	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
23/06	1 h	30	1,50	2,18	6,2	0,05	0,81
7/07	6 h	70	12,0	56,6	16,1	1,40	8,69
6/08	1 h 40	5	1,85	6,03	11,0	0,149	1,35
21/08	5 h 30	5	251	480	24,2	11,9	49,2
30/09	5 h	20	1,77	9,39	11,7	0,23	1,97

TIMIA BV 1 1980

Date	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
8/06	2 h 30	7	1,00	2,9	8,6	0,072	0,83
10/06	9 h 10	66	94,0	210	19,8	5,21	26,3
30/06	11 h 50	70	205	(195)	19,4	4,84	24,9
6/07	3 h 10	21	3,50	5,7	3,1	0,14	4,52
21/07	8 h 50	32	41,8	262	19,9	6,50	32,7
23/07	7 h 50	10	15,9	34	11,4	0,84	7,37
17/08	4 h 30	10	11,9	28	9,0	0,69	7,67
3/10	3 h	8	1,00	2,6	10,9	0,065	0,60

TIMIA BV 1 1981

Date	Te (h)	Tm (mn)	Qmax (m ³ /s)	Ve (10m ³)	Pm (mm)	Le (mm)	Ke (%)
6/08	7 h 25	3	43,2	129	16,4	3,20	19,5
7/08	7 h 10	5	49,4	240	19,1	5,96	31,2
13/08	5 h 50	9	43,2	140	8,6	3,48	40,5
29/08	8 h 50	3	9,1	42,8	11,6	1,06	9,14
29/08	12 h	5	23,3	168	9,3	4,17	44,8

ANNEXE 3-A.I,36 Caractéristiques des écoulements du BV1 de Timia
entre 1978 et 1981

Année	Dabaga	Razel	Azel	Agassaghas	Azamella	Toudou
1959	(53)	46	46			
1960	(32)	14	9			
1964	13	17	8			
1975			29			
1976	(8)		2			
1977	(54)		34			
1978	21		24	0,05	0,61	
1979	17,9	8	10	0,05	0,42	6
1980	49	52	46	0,24	2,5	33
1981	19,5	28	24			
1982	18,2	19	23	0,39	3,2	20
1983	14,7	6	6	0,01	0,43	4,1
1984	1,56	1,3	1,3	0,01	0	0,2
1985	16,7	11,5	12	0,15	1,8	8,4
1986	12,7	13	12	0,10	1,3	9,6
1987	4,77		2,7	0,01	0,01	0,002
1988	18,3		49	0,40	3,8	40
1989	(15)		9,2	0,20	1,8	7,9
1990	(7,8)		11			

ANNEXE 3-A.II,1 Volumes écoulés annuels du Téloua (en millions de m³)

Année	Dabaga	Razel	Azel	Agassaghas	Azamella	Toudou
1958		510				
1959		411				
1960		200	130			
1964	263	207	109			
1975			299			
1976			63			
1977			344			
1978	628	440	420	8,1	34,8	
1979	180		168	16,0	49,6	50,3
1980	592	562	416	8,2	99	274
1981	238	340	270			
1982	204	178	344	51	108	302
1983	204	67	53	2,7	51	39
1984	108	96	84	5	0	17
1985	445	224	337	36	118	324
1986	137	215	140	16	144	80
1987	92		74	0,86	1,6	28
1988	290		425	41	124	336
1989	110		56	33	85	60
1990	124		227			

ANNEXE 3-A.II,2 Débits de pointe annuels sur le bassin du Téloua (en millions de m³)

Année	Pluie moyenne (mm)	Lame d'eau écoulee (mm)	Coef. d'écoulement (%)
1959	170	34,3	20,2
1960	110	6,7	6,09
1964	100	6,0	6,00
1975		21,3	
1976	78	1,47	1,88
1977	145	25,0	17,2
1978	113	17,6	15,6
1979	100	7,35	7,35
1980	169	33,8	20,0
1981	119	17,6	14,8
1982	140	16,9	12,1
1983	70	4,41	6,30
1984	15	0,96	6,40
1985	76	8,82	11,6
1986	115	8,82	7,67
1987	56	1,99	3,55
1988	176	36,0	20,5
1989	99	6,77	6,84
1990	88	8,09	9,19

ANNEXE 3-A.III,1 Relation pluie moyenne - écoulement du bassin
du Téloua à Azel

AGASSAGHAS				AZAMELLA			
An	Pl. moy	Lam éc.	Coef.écoul	An	Pl. moy	Lam éc.	Coef.écoul
78	95,1	8,15	8,57	78	103	10	9,71
79	75	8,50	11,3	79	81	6,8	8,40
1980	150	41,9	27,9	1980	223	41,3	18,5
81				81			
82	171	68	39,8	82	147	51,7	35,2
83	70,4	2,1	2,98	83	70,6	7,0	9,91
84	8,0	2,03	25,5	84	7,40	0	0
85	65,3	26,3	40,3	85	73,6	30,3	41,2
86	110	17,5	15,9	86	98	20,7	21,2
87	30	1,43	4,77	87	26	0,18	0,70
88	176	64,9	36,9	88	168	57,5	34,2
89	130	34,2	26,3	89	119	28,8	24,2
DABAGA				RAZEL			
An	Pl. moy	Lam éc.	Coef.écoul	An	Pl. moy	Lam éc.	Coef.écoul
79	110	17,6	16,0	79	88,3	7,94	9,0
1980	156	47,7	30,6	1980	168	40,7	24,2
81	108	18,7	17,3	81	120	22,3	18,6
82	126	17,5	13,9	82	135	15,2	11,3
83	76	14,1	18,6	83	70,3	4,9	6,97
84	13,2	1,5	1,4	84	15,4	1,0	6,50
85	66,7	16,0	24,0	85	75	9,1	12,2
86	96	12,2	12,7	86	113	9,9	8,76
87	59,7	4,60	7,7	87			
88	168	17,6	10,5	88			

ANNEXE 3-A.III,2 Relation pluie moyenne - écoulement sur le bassin du Téloua (en mm, et Ke en %)

Année	Pl moy bassin (mm)	Pl an Agadez (mm)	Année	Pl moy bassin (mm)	Pl an Agadez (mm)
59	170	172	82	140	138
1960	110	147	83	70	94
64	100	129	84	15	4
1976	80	107	85	76	61
77	145	71	86	115	97
78	113	100	87	56	51
79	100	108	88	176	137
1980	169	156	89	99	131
81	119	127	1990	88	90

ANNEXE 3-A.III,3 Relation pluie moyenne sur le bassin du Téloua à Azel, pluie annuelle à Agadez

Date	DABAGA			RAZEL			AZEL		
	heure (h,mn)	Débit (m3/s)	Conc. (g/l)	heure (h,mn)	débit (m3/s)	Conc. (g/l)	heure (h,mn)	débit (m3/s)	Conc. (g/l)
3/7/80	23h10	565	10,1				21h45	46	20,6
13/7/80	19h12	70	2,85	7h20	16,7	3,17	21h00	60	5,04
14/7/80							18h42	26	12,6
15/7/80	3h55	555	12,3						
19/7/80	0h34	146	7,43	10h05	25	8,81	10h26	6	0,329
5/8/80	17h00	19,7	3,56				18h12	123	12,4
14/8/80							?	40	34,3
2/8/83							Crue	15,5	25,5
5/8/83							Crue	15,5	22,6
7/8/83							Décrué	43	21,9

Tab.1 Données caractéristiques des transports solides en suspension du Téloua en 1980 et 1983

Débit (m3/s)	Phase (Crue - Décrué)	Dist/R.G.(m) (largeur 170)	Concentration (g/l)
86	Crue	10	1,38
86	Crue	30	1,74
16	Crue	40	1,16
13,5	Décrué	5	0,745
13,5	Décrué	20	0,680
13,5	Décrué	40	0,780
13,5	Décrué	60	1,13
13,5	Décrué	80	0,825
16	Début Décrué	20	0,980
16	Début Décrué	40	0,975
16	Début Décrué	60	0,950
16	Début Décrué	80	1,035
4,1	Hypodermique	20	0,180
4,1	Hypodermique	60	0,220
25	Décrué	5	0,670
25	Décrué	15	0,745
25	Décrué	25	0,805
25	Décrué	40	0,775

Tab. 2 Flux de matières en suspension sur le Téloua à Razel Mamoulmi en 1959

ANNEXE 3-B.I,1 Concentrations antérieures à 1985 sur le Téloua

1985

Période de crue	V. crue (m3)	Q. Cmax (m3/s)	C. max (kg/m3)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km2)
8/08	180	0,125	15,6	1,9	0,564	1,84
10/08	2790	2,85			(18,274)	59,7
12/08	2100	1,61	16,5	26,6	13,620	44,5
18/08	864	0,52	6,3	3,3	3,216	10,5
Masse totale des suspensions du bassin élèves en 1985: 35,67 T soit 117 T/km ²						

1986

Période de crue	V. crue (m3)	Q. Cmax (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
27/07	2779	1,34			(18,2)	59,5
10/08	4764	2,43			(31,6)	103
18/08	759	0,590	12,4	7,31	4380	14,3
31/08	338	0,370	2,70	1,0	2784	9,10
5/09	738	0,890	2,30	2,05	720	2,35
Masse totale des suspensions du bassin élèves en 1986: 57,68 T soit 188 T/km ²						

V. crue : Volume de la crue

Q. Cmax : Débit correspondant à la C.max

C. max : Concentration maximale

Qs. max: Débit solide maximum

Flux : Masse transportée par la crue

Ds : Dégradation spécifique du bassin

ANNEXE 3-B.I,2: Transports solides en suspension sur le bassin "élèves"
en 1985 et 1986

1985

Période de crue	V. crue (10 ³ m ³)	Q. Cmax (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
26/06	47	21,3			(414)	0,3
16/07	364	54	44	2376	(5364)	3,9
20/07	483	28	30	840	(7661)	5,6
10/08	683	31	15,9	493	(5490)	4
12/08	203	9,3			(2257)	1,7
16/08	364	92	29,7	2732	(5364)	3,9
18/08	8717	200	22	4400	140700	103
Diverses	900*				(15709)	11,5
Masse totale des suspensions du Téloua à Azel en 1985					182959 T	soit 135 T/km ²

* Volume global de diverses petites crues de l'hivernage

1986

Période de crue	V. crue (10 ³ m ³)	Q. Cmax (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
11/06	12,3	1,4			(108)	0,08
25/06	260	7,8	4,01	313	2016	1,5
9/07	10,6	1,7			(93)	0,07
17/07	390	11,3	52	588	11820	8,7
19/07	332	7,8	66	515	(4747)	3,5
22/07	936	35	43	1505	16680	12,3
25/07	1212	62	32,9	2040	26640	19,6
29/07	338	11,3	21,2	240	(4862)	3,6
31/07	32,1	3,4			(282)	0,2
2/08	173	6,6			(1678)	1,2
3/08	1423	23	75,5	1737	30000	22
10/08	510	17,2			(8182)	6
13/08	1013	8,9	41,4	368	7020	5,2
18/08	0,8	2,2			(7)	0,005
26/08	453	11,3	36,3	410	3240	2,4
31/08	478	31,5			(7564)	5,6
2/09	445	8	42,5	340	12924	9,5
5/09	65	5	3,4	17	346	0,25
9/09	1332	140			(24047)	17,7
10/09	1593	24,4			(29084)	21,4
13/09	56	4,2			(493)	0,4
15/09	173	4,7			(1678)	1,2
20/09	1012	77,6			(17870)	13
Masse totale des suspensions du Téloua en 1986					211380 T	soit 155 T/km ²

V. crue : Volume de la crue

C. max : Concentration maximale

Flux : Masse transportée par la crue

Q. Cmax : Débit correspondant à la C.max

Qs. max : Débit solide maximum

Ds : Dégradation spécifique du bassin

ANNEXE 3-B.I.3 : Transports solides en suspension sur le Téloua à Azel en 1985 et 1986

ANNEXE 3-B.II,1

PRINCIPE DE LA MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION

I. Les prélèvements sur le terrain:

1) Leur représentativité:

Compte tenu du caractère, la plupart du temps, torrentiel des écoulements du Téloua, et de l'absence d'un matériel adéquat; préleveur sur transporteur aérien permettant d'explorer, à l'instar des prises de vitesses du jaugeage, le champ de la section mouillée, les prélèvements, au seau de 10 litres, ont été réalisés en berge rive gauche, à proximité de la surface, à la station hydrométrique d'Azél.

Le problème de la représentativité de ce prélèvement pour la section reste la principale incertitude de l'opération, bien qu'il soit permis d'estimer que les vitesses, la turbulence des écoulements sur cette rive concave enrochée du Téloua, créent des conditions d'homogénéité pour le transport.

Les observations réalisées par Lefèvre en 1959 (tab 2, Annexe 3-B.I,1), à une quinzaine de kilomètres en amont montre, qu'en surface, la différence de concentration entre la berge et le milieu du cours d'eau est peu sensible, aux erreurs de manipulation et de traitement près. A Azél, l'accélération des vitesses créée par la concavité de la berge, doit produire sur le lieu du prélèvement (au pied des échelles) des conditions proches du centre de la section.

La différence théorique du transport sur la verticale, en liaison avec le champ de vitesses, qui fait que les écoulements du centre de la section, au tiers ou au quart de la profondeur en partant de la surface, possèdent la plus grande capacité de transport, peut être relativisée pour les mêmes raisons de turbulence et de profil que précédemment.

Il est vraisemblable d'autre part que le charriage de fond, généralement estimé sur les grands cours d'eau, par la littérature, à 10 % du transport total, soit beaucoup plus élevé sur des oueds comme le Téloua (Billon, communication personnelle). Des études fines menées sur les transports solides dans l'Ader Douchi à 400 km au sud d'Agadez ont montré que le charriage de fond variait peu avec l'hydraulicité, contrairement aux transports en suspension. Il apparaît donc que les transports solides des écoulements les plus faibles soient, au travers de la seule mesure des suspensions, particulièrement sous-estimés. L'expérience personnelle de jaugeages à pied, atteste de cette réalité du transport de fond qui fait progresser les matériaux les plus pondéreux, par saltation, vers l'aval. L'ultime dépôt s'opèrent sur le cône de déjection, dans la cuvette périphérique; R. Lefèvre évalue à un mètre l'exhaussement du lit du Téloua, sur le cône de déjection d'Agadez, après l'année hydrologiquement excédentaire 1958.

Par analogie avec les travaux sur les transports solides du Tchad et du Maghreb, (Billon, 1968, 1974 - note technique), il est vraisemblable qu'il faudrait appliquer un coefficient

multiplicateur aux transports en suspension d'Azé pour tenir compte de la réalité du transport de fond; de "2" en année faible, et de "1,5" en année forte.

2) Leur fréquence:

Les expériences antérieures sur les transports en suspension (Billon, 1968) montrent que le maximum de concentration, qui correspond au maximum de lessivage sur les bassins, précède généralement celui des débits. La rapidité de montée des crues sur les koris de l'Air, dont le régime est comparable à celui des oueds maghrébins, a justifié la mise au point d'un protocole de prélèvements fondés seulement sur l'évolution de la cote à l'échelle: Ainsi les prélèvements d'eau ont eu lieu tous les dix centimètres en crue, tous les vingt ou trente centimètres en décrue, où les phénomènes hydrologiques deviennent plus progressifs. Le nombre d'échantillons prélevés pour contrôler une crue est donc directement proportionnel à l'importance de la cote atteinte: quinze à vingt pour une crue moyenne à 1,5 m sur le Téloua, le double pour une grosse crue de 2,5 m.

II) Le traitement des échantillons:

Les échantillons prélevés sont traités en vue de définir la concentration à l'instant du prélèvement (pour une hauteur et donc un débit donné).

1) décantation- filtration:

Chaque échantillon prélevé est soigneusement transvasé dans une dame-jeanne étalonnée pour y subir une décantation durant quelques jours. L'eau surnageant le décantat est ensuite siphonnée jusqu'à un ou deux centimètres du dépôt de fond. Ce dernier vigoureusement homogénéisé avec le reliquat d'eau est alors passé dans un filtre papier (1 μ), préalablement pesé au centième de gramme.

2) Séchage-étuvage-pesée:

La deuxième phase de l'opération consiste à laisser sécher le filtre chargé, puis à l'étuver à 105° (température permettant de conserver la matière organique) durant 24 heures, afin d'en éliminer totalement l'eau. Le filtre et son contenu sont pesés dès la sortie de l'étuve. La masse des sédiments rapprochée du volume d'eau dont elle est extraite permet de définir la concentration du prélèvement en gramme par litre (g/l).

III) Le principe du calcul des débits solides et des flux de matières en suspension:

1) Les débits solides;

Ils sont obtenus en rapprochant les concentrations des débits liquides correspondants:

$$\text{Concentration (g/l)} \times \text{Débit (l/s)} = \text{Débit solide (g/s)}$$

2) Les flux de matières en suspension:

Comme les volumes écoulés, les masses transportées sont obtenus en intégrant dans le temps les débits solides du turbidigramme:

$$Q_s \text{ (g/s)} \times T \text{ (s)} = \text{Masse transportée (g)}$$

IV) L'analyse granulométrique:

Elle permet de déterminer les types de matériaux transportés. Les échantillons de sédiments de deux crues (une importante en 1988 de plus de 200 m³/s, et une faible en 1989 d'à peine plus de 20 m³/s) ont été passés au granulomètre laser dont le champ d'investigation s'étend de 0,1 à 1000 μ. L'ordinateur associé au couler laser produit les données statistiques de base sur la répartition du volume de sédiment en fonction de la taille de ses éléments. Les limites habituellement retenues pour différencier les éléments fins sont les suivantes:

de 0 à 2 μ : les argiles

de 2 à 20 μ : les limons fins

de 20 à 50 μ : les limons grossiers

Au dessus de 50 μ : les sables

Deux courbes sont présentées automatiquement, qui permettent d'évaluer directement la qualité et la répartition du sédiment en suspension:

La première qui présente le pourcentage en volume de chaque diamètre de particule permet de dégager le ou les types de sédiments majoritaires (ex. fig.3-B.2)

La seconde qui donne les mêmes pourcentages cumulés permet de distinguer l'importance de chaque type de particules par rapport à l'ensemble (ex. fig.3-B.3)

1987

Période de crue	V. crue (10 ³ m ³)	Q. max (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
19/07	820	74	36,67	2714	35040	25,8
20/07	89	2,4	19,74	47,4	1023	0,752
26/07	301	4,3	66,31	285	8853	6,51
27/07	66	2,6	51,84	135	1779	1,31
30/07	54	2,8	18,16	50,8	903	0,664
1/08	90	3,5	36,13	126	1872	1,38
22/08	8,3	2,2	22,25	49	247	0,182
23/08	896	28	114,4	3238	30950	22,8
27/08	408	17	43,88	746	8353	6,14
Masse totale des suspensions du Téloua en 1987 89020 T soit 65,5 T/km²						

1988

Période de crue	V. crue (10 ³ m ³)	Q. max (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
6-9/06	4439	213	36,7	3487	77670	57,1
10-12/07	810	44	43,4	1551	18432	13,6
13-15/07	7421	360	39,3	5276	103392	76,0
18-21/07	1706	23	13,3	465	4608	3,39
22-24/07	2560	32	12,9	310	13536	9,95
25-27/07	8000	393	18,4	4618	69120	50,8
14-16/08	953	17	13,6	22	4262	3,13
16-19/08	9527	425	13,3	168	56736	41,7
23-26/08	6500	215	23,7	3060	48528	35,7
26-28/08	1800	48	7,16	299	6955	5,11
29-31/08	1700	31	8,00	248	5861	4,31
1-4/09	1594	28	5,09	113	5342	3,93
5-6/09	730	27	4,86	116	1634	1,2
8/09	88	5,4	2,45	24	202	0,15
Masse totale des suspensions du Téloua en 1988: 416278 T soit 306 T/km²						

V. crue : Volume de la crue
 C. max : Concentration maximale
 Flux : Masse transportée par la crue

Q. max : Débit maximum de la crue
 Qs. max : Débit solide maximum
 Ds : Dégradation spécifique du bassin

ANNEXE 3-B.III,1 : Transports solides en suspension du Téloua à Azel en 1987 et 1988

1989

Période de crue	V. crue (10 ³ m ³)	Q. max (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
2-3/08	147	14,4	10,7	112	1692	1,24
7/08	184	28,4	9,3	207	828	0,61
10-11/8	1017	32,8	36,3	541	300	0,22
13-15/8	1024	22,3	35,8	396	240	0,18
16-19/8	2332	55,8	44,9	1690	17898	13,2
22-24/8	2457	47,1	18,3	454	18900	13,9
24-25/8	149	22,2	28,2	533	1380	1,01
26-27/8	830	21,3	13,2	259	4104	3,02
27-28/8	495	9,60	2,7	25,7	842	0,62
8-9/09	694	12,4	32,1	204	4888	3,59
Masse totale des suspensions du Téloua en 1989: 51072 T soit 37,6 T/km ²						

1990

Période de crue	V. crue (10 ³ m ³)	Q. max (m ³ /s)	C. max (kg/m ³)	Qs. max (kg/s)	Flux (T)	Ds (T/km ²)
12-13/7	9,78	3,2	6,9	22,2	45	0,033
13-14/7	36,5	3,9	13,2	27,9	180	0,132
14-15/7	230	34,1	16,4	469	2310	1,70
19-20/7	38,6	5,38	16,1	86,6	216	0,159
23/7	392	204	43,8	6901	11400	8,38
24-25/7	3080	227	18,1	5486	38400	28,2
28-30/7	605	31	36,5	596	10860	7,99
31-3/8	2101	179	16,1	2094	151200	111
3-4/8	1079	65,6	8,6	439	4980	3,66
8-9/8	1100	17,5	16,0	1983	8400	6,18
10-11/8	526	11,5	15,9	151	1926	1,42
13-14/8	224	11,5	9,3	62	1101	0,81
14-15/8	173	17,7	9,7	144	879	0,646
20/8	16,4	0,54	3,46	0,63	2,64	0,002
1-9	4,83	0,37	1,32	0,25	1,50	0,001
Masse totale des suspensions du Téloua en 1990 231901 T soit 171 T/km ²						

V. crue : Volume de la crue
 C. max : Concentration maximale
 Flux : Masse transportée par la crue

Q. max : Débit maximum de la crue
 Qs. max : Débit solide maximum
 Ds : Dégradation spécifique du bassin

ANNEXE 3-B.III,2 : Transports solides en suspension du Téloua à Azel en 1989 et 1990

ANNEXE 4-A.I,1

PRINCIPE DES ISOTOPES EN MILIEU NATUREL

Les isotopes, qui obéissent aux mêmes lois de répartition que les réactions chimiques, présentent une spécificité thermodynamique intéressante; "puisque'ils peuvent s'échanger entre deux composés ou deux phases comprenant le même élément, sans qu'aucune réaction, autre qu'isotopique, ne s'opère d'une phase à l'autre, d'un composé à l'autre" (J-Ch Fontes 1976).

Un isotope étant un atome d'un élément possédant un même nombre de charges (électrons périphériques) mais un nombre de masses atomiques différent, la réaction isotopique se traduit par un simple transfert de masse d'une espèce (banale ou isotopique) à l'autre, et *vice versa*. La mesure isotopique consiste donc à mesurer, grâce au spectromètre, les très légères différences de masse des noyaux atomiques. Le principe consistant à différencier, par déviation électromagnétique, les atomes "lourds" des atomes "légers", ayant acquis, par le biais d'une énergie cinétique adéquate, une masse mesurable.

La variation relative des masses isotopiques étant déjà très significative, la mesure différentielle, exprimée par " δ ", est jugée suffisante:

$$\delta = \frac{\text{Rapport isotopique de l'échantillon} \approx \text{concentration de l'espèce isotopique lourd}}{\text{Rapport isotopique de l'étalon}} - 1$$

L'étalon représentant la composition isotopique moyenne des eaux océaniques SMOW (Standard Mean Océan Water de Craig, 1961; ou V-SMOW pour Vienne-SMOW de Gonfiantini, 1975)

Dans la pratique δ s'exprime en parts pour mille (‰); ainsi pour l'oxygène :

$$\delta = \left[\frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} (\text{échant})}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} (\text{étalon})} - 1 \right] \times 1000$$

où : ^{18}O représente l'isotope rare,
 ^{16}O représente l'isotope banal.

Pour les eaux naturelles, les isotopes stables les plus couramment utilisés sont :

– l'Oxygène-18 (^{18}O), isotope lourd et rare de l'oxygène banal (^{16}O), dont la fréquence moyenne est d'environ 2000 ppm (partie par million), et le domaine de variation (ou δ) de 100 ‰,

– le Deutérium (^2H), isotope lourd et rare de l'hydrogène (^1H) dont la fréquence moyenne est d'environ 156 ppm et le domaine de variation de 500 ‰.

La précision attendue sur la mesure est de 0,1 à 0,2 % pour l'Oxygène-18, et d'environ 2 % pour le Deutérium.

a) Principe du traçage de la molécule d'eau:

Grâce à ses isotopes, oxygène-18 et deutérium, la molécule d'eau apparaît tracée dans l'intimité de son noyau. Un changement de phase liquide-gazeux ou gazeux-liquide se traduit par un fractionnement isotopique, manifestation de tensions de vapeur saturantes légèrement différentes de chacune des phases.

Ainsi, les phénomènes naturels de vaporisation ou de condensation de l'atmosphère s'accompagnent-ils d'un fractionnement isotopique.

Ce fractionnement, expérimentalement reproduit par différents auteurs, dont Craig en 1969, dépend essentiellement de la température; le fractionnement décroît lorsque la température augmente et inversement.

$$1000 \ln \alpha^{18\text{O}} = 2,644 - 3,206 \times \frac{10^3}{T} + 1,534 \times \frac{10^6}{T^2}$$

Où T est la température en degré Kelvin

α (le facteur de fractionnement) : $\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{Liq}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{Vap}}}$

est peu différent de "1". le facteur de fractionnement est donc assimilable à $\alpha - 1$.

Cette relation, qui est univoque dans le domaine de variation de température des eaux naturelles, traduit l'enrichissement ou l'appauvrissement isotopique de l'une des phases par rapport à l'autre :

La vapeur est toujours appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide dont elle est issue, le condensât toujours enrichi par rapport à sa masse de vapeur d'origine.

b) Principe du traçage aux changements de phase:

.A la condensation :(Dansgaard,1964; Fontes, 1976; Zuppi et al, 1974...)

A chaque précipitation le réservoir de vapeur du nuage se sépare préférentiellement de ses atomes lourds. Il s'ensuit un appauvrissement progressif des teneurs en Oxygène-18 et en Deutérium, à la fois du réservoir, et des pluies, lors des épisodes successifs dans la progression de la masse d'air. C'est l'effet de continentalité.

Autre facteur influençant le traçage isotopique à la condensation: la température.

Cette dernière décroît avec l'altitude suivant un effet thermodynamique bien connu: la pression diminue avec l'altitude entraînant la détente des masses d'air et la chute des températures.

Cette décroissance, qui est comprise entre 0,6 et 0,8 °C par 100 mètres, montre donc qu'un rapport assez étroit existe entre la température de condensation à la base du nuage et celle mesurée au sol.

L'importance de ces facteurs a été mise en évidence depuis plus de vingt ans par un certain nombre d'auteurs:

- Pour la température et la latitude par Dansgaard dès 1964,
- Pour l'altitude par Gonfiantini en 1970, puis Payne Yurtsever et Zuppi en 1974, Fontes en 1976 dans différents milieux climatiques.

Dansgaard propose une relation simple liant la teneur en oxygène-18 des pluies et la température moyenne annuelle au sol (pour une vapeur d'eau en équilibre dans l'environnement océanique) :

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0,69 t_{\text{moy}} - 13,6$$

Des conditions locales différentes, continentalité (latitude) et altitude en particuliers, conduiront à la recherche d'une autre relation de même type (J-Ch Fontes, 1976; Gonfiantini, 1995). Blavoux (1978) obtient la relation suivante sur les pluies de Thonon les Bains:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0,45 t_{\text{moy}} - 13,51 \pm 2,08$$

R. Gonfiantini avait déjà mis en évidence, en 1970, sur les pentes du Kilimanjarø, une relation linéaire entre la teneur en Oxygène-18 et l'altitude, dont la pente était de - 0,3 δ par 100 mètres. Cette relation avec l'altitude est en fait très dépendante des conditions locales et la pente varie suivant les lieux d'investigation et les auteurs de - 0,16 δ à - 0,35 δ par 100 mètres.

Des conditions proches de la saturation, donc de l'équilibre, vont limiter les échanges liquide - vapeur et produire les évolutions isotopiques les plus faibles en fonction de l'altitude (J-Ch Fontes et J-C Olivry en 1976 au Mont Cameroun : - 0,16 δ / 100 m)

. A l'évaporation : (Craig et al , 1961, 1963; Fontes et al, 1967; Gat et al, 1981)

A l'inverse du phénomène de condensation, un réservoir qui s'évapore perd préférentiellement ses atomes légers. Il s'ensuit donc un enrichissement relatif en atomes lourds de la fraction restant liquide.

Dans les conditions naturelles, l'évaporation se développe à divers stades du cycle de l'eau:

Dès la condensation, et le début de la chute sous le nuage, des échanges cinétiques se développent entre les gouttelettes d'eau et l'atmosphère ambiante, pour peu que cette dernière ne soit pas à saturation, ce qui est souvent le cas en milieu aride.

Lors des écoulements fluviaux, des ruissellements superficiels; lors des phénomènes de rétention de sub-surface, et jusque dans la zone non saturée des phénomènes d'évaporation sont perceptibles (Allison et al, 1984; Aranyosy 1991, Barnes et Allison, 1982; Fontes et al, 1966 et 1967; Joseph et al, 1992....).

Enrichissement, comme appauvrissement ne se développent cependant pas jusqu'à atteindre les valeurs d'une distillation fractionnée adiabatique de Rayleigh, car des échanges permanents viennent limiter les processus.

Comme l'appauvrissement consécutif à la condensation, l'enrichissement lié à l'évaporation est dépendant des conditions climatiques locales : température, humidité relative, cinétique de l'évaporation en partie liée aux conditions de ventilation, diffusion différentielle isotopique dans l'air.

En milieu subdésertique, les variations isotopiques sont très marquées; elles atteignent 20 ‰ pour l'Oxygène-18, et 60 ‰ pour le Deutérium; mais restent en deçà des valeurs extrêmes relevées par Fontes et Gonfiantini (1967) sur une guelta saharienne proche de Béni-Abbès; respectivement près de 40 ‰ pour l'Oxygène-18 et 150 ‰ pour le Deutérium.

Le rôle de la végétation dans les phénomènes d'enrichissement et d'appauvrissement est limité (Bariac, 1988); il le sera d'autant plus que la couverture végétale dans le milieu subdésertique de l'Air est extrêmement restreinte. Le système entre sucs végétaux enrichis, transpiration et alimentation par la nappe, serait en régime permanent, dès lors que la transpiration présenterait une composition isotopique du même ordre que celle de la nappe (J-Ch Fontes, 1976). Cet équilibre, dans notre milieu, sera d'autant plus facilement atteint que les échanges sont limités en raison de l'adaptation même des plantes à la sécheresse:

.système souterrain cinq à dix fois plus important que le système aérien permettant d'aller chercher l'eau très loin, parfois bien en dessous de la zone non saturée;

.raréfaction des surfaces d'échanges, diminution du nombre des feuilles, de leur taille, du nombre de leurs stomates;

.modification de la structure des feuilles, vernissage de leur surface ou enroulement en épine...

Si les échanges apparaissent relativement limités avec la végétation, ils sont très poussés dans le cas de réservoirs à surface libre, ou sur la zone non saturée. Fontes (1976) montre qu'en milieu aride les variations en oxygène-18, comme en deutérium, sont sensibles jusqu'à moins de 5 % de fraction restante du réservoir évaporant. A titre de comparaison, dans les régions humides, le domaine de variation apparaît nettement plus limité à 40 % de la fraction restante.

Compte tenu donc de ses conditions naturelles extrêmes le milieu aride semble donc un milieu particulièrement favorable à l'utilisation des marqueurs isotopiques.

c) Relation deutérium / oxygène 18:

Les bonnes relations qui lient chacun des deux isotopes stables de l'eau (Oxygène-18 et Deutérium) aux mêmes facteurs locaux, les causes du fractionnement étant identiques dans les deux cas, il est naturel de concevoir qu'une liaison intime existe entre les deux isotopes. Cette liaison est mise en évidence par Craig dès 1961, à l'échelle mondiale, pour les eaux de précipitations océaniques.

La relation linéaire, qui porte encore son nom, et qui constitue la référence de toute étude isotopique des eaux naturelles, a pour expression :

$$\delta ^2\text{H} = 8 \delta ^{18}\text{O} + 10$$

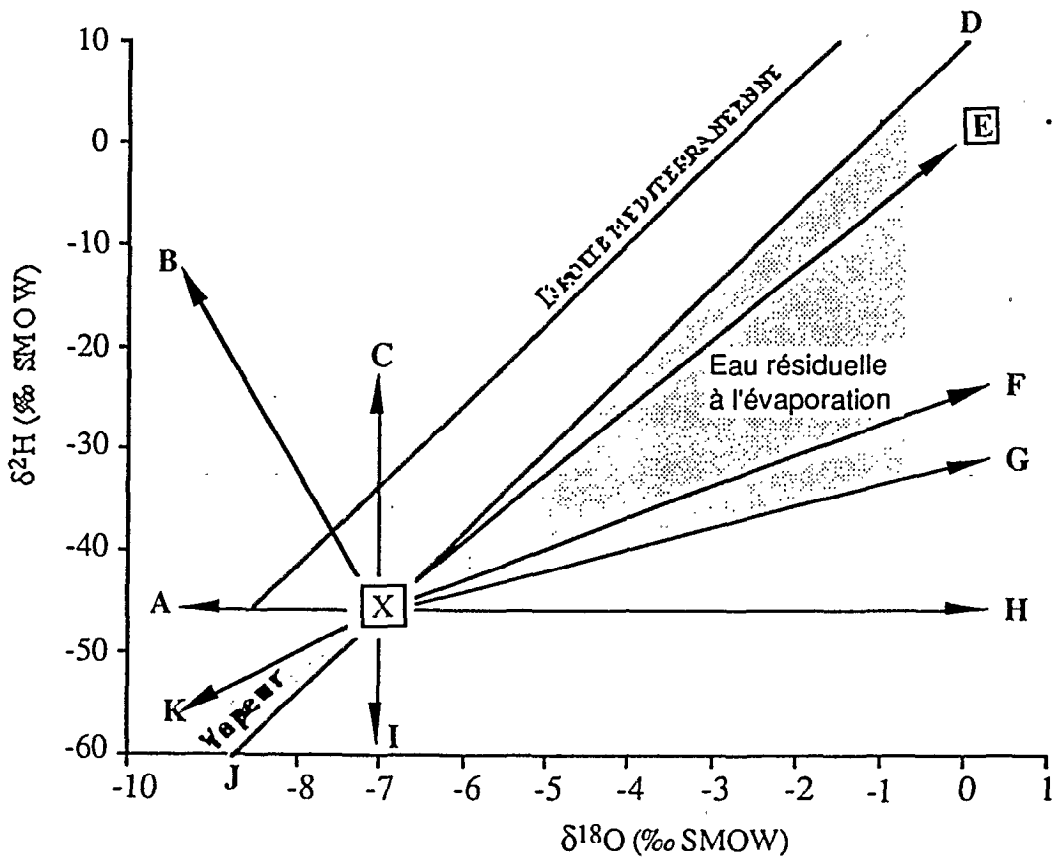
La pente de "8", peu variable, reflète le phénomène de condensation à l'équilibre; en absence donc de phénomène d'évaporation.

Sur les continents, les eaux naturelles qui se trouvent toutes plus ou moins éloignées de leur lieu de condensation, sont donc soumises, à un moment ou un autre, à évaporation. Une pente inférieure à "8" de la relation oxygène-18 - deutérium traduit le déséquilibre qui résulte de cette évaporation. Plus la pente est faible, plus le phénomène d'évaporation est important (figure)

L'ordonnée à l'origine, encore appelée "excès en deutérium" (d), non nulle, exprime le fait que l'évaporation des eaux océaniques, intervenant dans une atmosphère non saturée, produit une vapeur qui n'est pas en équilibre avec son eau d'origine (Merlivat et Jouzel, 1979). Un excès en deutérium supérieur à "10" signale un recyclage important de la vapeur originelle sur les continents et les mers fermées (sur le pourtour méditerranéen $d = 22$).

Un déficit en deutérium ($d < 10$) traduit généralement une ré-évaporation des gouttes de pluies en cours de chute, en milieu non saturé. C'est la plupart du temps le cas dans l'environnement subdésertique de l'Aïr.

Le milieu climatique de l'Aïr, de par son aridité, ses fortes températures, exacerbe le phénomène d'évaporation qui est l'un des facteurs d'efficacité de la mise en œuvre de l'outil isotopique.



ANNEXE 4-A.I,2 **Processus géochimiques et composition isotopique des eaux naturelles (IAEA, 1983).**

[JXD] : Droite météorique mondiale.

[X] : Composition initiale de l'eau.

[E] : Eau de mer.

[XE] : Mélange avec l'eau de mer.

[XF] : Ultrafiltration à travers les argiles (pente 3).

[XH] : Echange avec l'encaissant (silicaté ou carbonaté) à haute température et/ou échange avec du CO₂ "riche" (pente 0).

[XI] : Echange avec H₂ et/ou CH₄.

[XA] Echange avec du CO₂ "pauvre" (pente 0).

[XB] : Hydratation des silicates.

[XC] : Echange avec H₂S.

XDG : Domaine d'évaporation (eau résiduelle), fonction de la température et de l'humidité relative de l'air. L'évaporation à température ambiante montre généralement des pentes de 4 à 6 et l'évaporation à température proche de l'ébullition montre des pentes allant de 2 à 3.

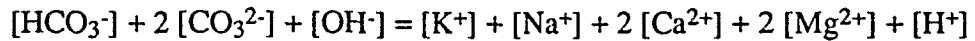
XKJ : Domaine d'évaporation (vapeur formée).

DROITE MEDITERRANEENNE : excès en deutérium = 22, caractéristique des précipitations de milieux fermés

ANNEXE 4-A.I,3 : RELATIONS CHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

pH, Alcalinité et Minéralisation: (Garrels et Christ, 1967; Sigg et al., 1994; Bourrié, 1976)

Si on considère que les sulfates (SO_4^{2-}) et les chlorures (Cl^-), apportés essentiellement par les précipitations, sont en proportion toujours faible dans les eaux naturelles de surface, l'équation d'électro-neutralité prend alors la forme:



Lorsque le pH est compris entre 6,7 et 8,1 ce qui est le domaine courant des eaux naturelles, les bicarbonates représentent une proportion très importante des anions, puisqu'il n'y a pratiquement pas de carbonates (CO_3^{2-}) et d'hydroxydes (OH^-):

$$[\text{HCO}_3^-] \geq 100 (2 [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] + [\text{H}^+])$$

La concentration en bicarbonates correspond donc globalement à la somme des concentrations cationiques:

$$[\text{HCO}_3^-] \approx [\text{K}^+] + [\text{Na}^+] + 2 [\text{Ca}^{2+}] + 2 [\text{Mg}^{2+}]$$

Or $[\text{HCO}_3^-]$ est issu de la réaction: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ dont la constante d'équilibre:

$$\begin{aligned} \log K &= \log [\text{HCO}_3^-] + \log [\text{H}^+] - \log p\text{CO}_2 \\ &= -7,83 \end{aligned}$$

Dont l'on tire:

$$-\log [\text{H}^+] = \log [\text{HCO}_3^-] - \log p\text{CO}_2 + 7,83$$

Si on considère que dans l'atmosphère $\log p\text{CO}_2 \approx \text{cte} \approx -3,5$

$$-\log [\text{H}^+] \approx \log [\text{HCO}_3^-] + 11,33$$

$$\text{pH} \approx \log [\text{HCO}_3^-] + 11,33$$

De tout ce qui précède on peut déduire:

- pH et alcalinité évoluent normalement dans le même sens,
- Un pH supérieur à 8,3 signale l'existence d'un équilibre avec le système calco-carbonique, l'eau pourra être saturée en calcite et contenir des carbonates (CO_3^{2-})
- pH et pression de gaz carbonique évoluent en sens inverse; un pH croissant pourra donc correspondre à une diminution de $p\text{CO}_2$, c'est à dire à un phénomène de dégazage,

- pH ou alcalinité élevés pourront aussi correspondre à une concentration des cations résultant de phénomènes d'hydrolyse,
- Une augmentation du pH, sans variation sensible de l'alcalinité, traduira donc un dégazage d'eaux non soumises à des phénomènes d'hydrolyse.

Conductivité:

La conductivité des eaux est fortement liée à la minéralisation. Ainsi pour des conductivités moyennes comprises entre 300 et 800 $\mu\text{mho/cm}$ à 20° C:

$$\text{Minéralisation (mg/l)} = 0,688 \text{ Conductivité } (\mu\text{mho/cm})$$

(Richard et Nguyen van cu, 1961)

Mais une augmentation de la conductivité pourra correspondre:

- Soit à une augmentation de la minéralisation, à la suite de phénomènes d'hydrolyse, avec conservation du volume d'eau,
- Soit à une concentration des ions résultant de phénomènes d'évaporation, avec réduction du volume d'eau.

Une augmentation simultanée de la conductivité et de l'alcalinité d'une eau sera donc significatif d'une augmentation de la minéralisation liée avant tout à des phénomènes d'hydrolyse.

Par contre, une conductivité qui augmente sans évolution sensible de l'alcalinité signalera un simple phénomène d'évaporation. Si l'alcalinité est faible, la conductivité est essentiellement liée à une concentration des chlorures.

Température:

La variation nyctémérale de température des eaux est fonction de la masse d'inertie en jeu et de la distance avec l'atmosphère:

- Elle apparaît rapide à proximité de la surface, où l'équilibre avec l'atmosphère est vite réalisé,
- La vitesse de variation décroît rapidement en profondeur, et en dessous de deux mètres dans la ZNS, la température des eaux tangente avec celle de la moyenne annuelle de surface.

AZEL

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	U (%)	Tsol (°C)	Excès Deut
9/7/90	3,3	6,59	28,6	54	36	-24,1
10/7/90	3,1	5,23	24,4	80	28	-17,4
12/7/90	4,2	3,42	19,7	67	33,8	-7,7
13/7/90	10,8	2,09	11,7	40	30	-5,0
14/7/90	2,1	5,11	25,9	59	26,7	-15,0
20/7/90	15,1	-3,79	-30,1	47	29,8	0,2
23/7/90	1,6	1,11	3,8	66	25,7	-5,1
28/7/90	10,4	-0,19	-3,1	32	36,3	-1,6
31/7/90	33,1	-0,90	-9,6	98	23,3	-2,4
3/8/90	50,8	-5,12	-29,7	84	23,5	11,3
8/8/90	21,5	-2,13	-12,9	64	27	4,1
10/8/90	7,6	2,06	5	44	29,6	-11,5
11/8/90	8,0	-0,49		61	25	
13/8/90	1,6	2,08	12	88	22,4	-4,6
15/8/90	2,0	6,07	29,4	62	27	-19,2
19/8/90	2,5	3,54	14,9	22	39,5	-13,4
6/9/90	8,6	-1,33	-9,9	23	38,2	0,7
Tot-MOY	186,3	1,37	5,0	58,3	29,5	-6,9

AOUDERAS

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès deut
22/5/90	1,5	11,05	43,8	-44,6
3/7/90	6,4	7,51	35,1	-25,0
9/7/90	5,9	4,75	27,8	-10,2
11/7/90	13,0	1,46	11,4	-0,3
13/7/90	1,3	3,14	11,1	-14,0
14/7/90	2,9	1,80	5,0	-9,4
15/7/90	1,2	8,09	32,6	-32,1
16/7/90	1,9	4,33	18,0	-16,6
20/7/90	2,9	0,58	-1,2	-5,8
22/7/90	2,5	-2,56	-22,9	-2,4
24/7/90	5,4	2,32	-4,7	-23,3
28/7/90	2,4	2,63	10,5	-10,5
31/7/90	11,4	-1,51	-12,7	-0,6
3/8/90	6,4	-4,12	-26,6	6,4
10/8/90	1,0	4,46	8,0	-27,7
10/8/90	9,5	2,18	8,2	-9,2
13/8/90	1,2	1,49	6,3	-5,6
14/8/90	0,5	6,98	33,2	-22,6
SOM/MOY	77,3	3,03	10,2	-14,1

ANNEXE 4-A.II,1 Tab.1 Isotopes des pluies en 1990

DABAGA

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès deut
18/5/90	2,0	7,74	28,1	-33,8
9/7/90	6,0	4,76	28,9	-9,2
10/7/90	8,5	4,42	7,3	-28,1
16/7/90	5,0	-0,64	-9,8	-4,7
20/7/90	7,5	0,15	-4,2	-5,4
22/7/90	5,5	0,11	-3,3	-4,2
22/7/90	9,0	-1,06	-20,4	-11,9
23/7/90	21,0	-3,2	-24,5	1,1
29/7/90	2,0	7,01	20	-36,1
31/7/90	10,5	-1,34	-8,3	2,4
9/8/90	1,2	4,23	18,8	-15,0
13/8/90	6,0	2,71	14,7	-7,0
14/8/90	8,3	3,12	18,8	-6,2
27/8/90	2,9	3,36	12,2	-14,7
Tot/MOY	95,4	2,24	5,59	-12,3

ABARDOK

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès deut
14/7/90	13,5	5,50	21,0	-23,0
18/7/90	2,0	0,47	1,1	-2,7
20/7/90	2,2	0,66	-0,1	-5,4
21/7/90	2,0	0,29	-9,6	-11,9
23/7/90	5,0	0,55	-7,3	-11,7
24/7/90	8,2	0,10	-9,0	-9,8
25/7/90	2,0	0,84	-9,3	-16,0
27/7/90	1,0	5,95	25,0	-22,6
1/8/90	2,0	2,46	3,2	-16,5
3/8/90	2,2	1,48	5,5	-6,3
10/8/90	1,3	4,36	21,2	-13,7
13/8/90	1,5	5,33	16,8	-25,8
18/8/90	1,6	2,66	11,3	-10,0
Tot/MOY	44,5	2,36	5,4	-13,5

ANNEXE 4-A.II,1 Tab.2 Isotopes des pluies en 1990

AZEL

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{2}\text{H}$ (‰)	Excès deut
10/7/89	4,5	2,84	1,5	-21,2
14/7/89	4,7	8,51	-6,5	-74,6
18/7/89	0,7	7,55	28,1	-32,3
29/7/89	9,6	10,86	34,0	-52,9
1/8/89	1,4	5,74	12,1	-33,8
2/8/89	8,7	5,98	12,8	-35,0
5/8/89	21,4	2,17	5,0	-12,4
7/8/89	30,6	-0,53	-15,5	-11,3
9/8/89	4,5	0,61	7,3	-35,7
10/8/89	5,6	0,53	-1,8	-6,0
15/8/89	2,8	0,92	-6,2	-13,6
16/8/89	4,1	-3,33	-24,7	1,9
18/8/89	5,2	-1,66	-15,5	-2,2
22/8/89	3,1	8,67	7,2	-62,2
27/8/89	1,4	4,81	15,4	-23,1
28/8/89	5,3	2,33	11,0	-7,6
8/9/89	10,0	0,66	4,2	-1,1
9/9/89	4,5	0,61		
Tot-Moy	128,1	0,40	4,0	-24,9

AOUDERAS

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{2}\text{H}$ (‰)	Excès deut
1/7/89	3,2	5,28	12,7	-29,5
3/7/89	2,0	3,44	-1,5	-29,0
13/7/89	24,3	1,42	-8,8	-20,2
18/7/89	8,3	2,76	-2,1	-24,2
20/7/89	8,2	3,49	9,2	-18,7
31/7/89	9,5	5,09	16,2	-24,5
5/8/89	26,3	8,05	18,4	-46,0
7/8/89	12,0	4,53	1,2	-35,0
8/8/89	3,1	2,32	-4,5	-23,1
9/8/89	46,6	0,50	-3,0	-7,0
10/8/89	5,5	2,44	8,2	-11,3
12/8/89	1,4	-2,43	2,8	22,2
15/8/89	14,0	0,93	-18,4	-25,8
15/8/89	20,7	-0,60	-28,7	-23,9
17/8/89	6,1	0,97	-18,1	-25,9
18/8/89	1,4	2,51	2,5	-17,6
20/8/89	2,5	6,25	12,0	-38,0
21/8/89	2,7	2,53	-4,6	-24,8
22/8/89	2,2	4,60	7,5	-29,3
25/8/89	2,5	-3,03	-18,7	5,5
26/8/89	2,6	0,49	14,4	10,5
26/8/89	3,0	7,26	24,6	-33,5
8/9/89	0,5	11,22		
9/9/89	0,5	7,75		
Tot-Moy	209,7	2,54	1,0	-20,4

ANNEXE 4-A.II,1 Tab. 3 Isotopes des pluies en 1989

DABAGA

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès deut
24/6/89	1,2	7,31	25,5	-33,0
1/7/89	1	5,41	11,1	-32,2
6/7/89	4	8,26	22,6	-43,5
10/7/89	4,5	5,84	8,3	-38,4
18/7/89	11	4,92	9,1	-30,3
20/7/89	12	5,35	8,9	-33,9
2/8/89	6	5,46	14,2	-29,5
5/8/89	2,5	2,36	-3,8	-22,7
8/8/89	3	0,37	-6,3	-9,3
9/8/89	27	-2,13	-2,2	14,8
12/8/89	7,5	-3,70	-30,4	-0,8
15/8/89	4,5	2,80	0,9	-21,5
17/8/89	19	-0,23	-22,6	-20,8
22/8/89	3,5	-0,36	-16,4	-13,5
Tot-Moy	106,7	2,98	1,35	-22,5

ABARDOK

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès deut
18/7/89	8,2	7,24	11,5	-46,4
8/8/89	14,6	1,82	-10,5	-25,1
12/8/89	25,1	-0,60	-2,3	2,5
16/8/89	2,5	-2,11	-19,9	-3,0
18/8/89	4,2	-2,19	-30,7	-13,2
7/9/89	8,5	3,58	16,9	-11,7
8/9/89	3,0	5,11		
Tot-Moy	66,1	1,84	-5,83	-16,15

ANNEXE 4-A.II,1 Tab. 4 Isotopes des pluies en 1989

AZEL

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Excès D ‰	U (%)	Ts (°C)
6/6/88	28					
7/6/88	26					
7/7/88	0,6	10,77	42,1	-44,06	71	34,5
10/7/88	11,5	5,97	11,2	-36,56	94	24,3
13/7/88	1,7	6,12	17,5	-31,46	50	30
14/7/88	7,6	0,71	46,4	40,72	63	28,5
17/7/88	2,6	-1,43	-9,7	1,74	80	25,9
19/7/88	15,9	-3,86	-20,4	10,48	41	36
22/7/88	9	-0,55	-8,1	-3,7	78	26,2
25/7/88	9,7	-2,95	-15,1	8,5	78	25
6/8/88	4,3	-0,19	-4,9	-3,38	71	28
9/8/88	0,5	8,74	30,3	-39,62	27	38
13/8/88	4,8	-3,55	-21,9	6,5	100	28,5
16/8/88	2,4	-3,42	-23,5	3,86	62	27
23/8/88	24,1	-5,49	-40,6	3,32	58	27,6
24/8/88	33,5	-8,38	-58,7	8,34	88	25
29/8/88	8,1	-3,07			68	26,5
17/9/88	1	10,75			97	31,5
24/9/88	1,4	9,14			46	37
Tot/Moy	192,7	1,14	-3,96	-5,4	68,9	29,4

AOUDERAS

Date	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	% P.An.	^{18}O pond	Exc D. ‰
3/7/88	1,2	4,00	17,1	0,847	0,03	-14,9
6/7/88	0,4					
7/7/88	1,1					
8/7/88	11,7	3,50	14,3	8,263	0,29	-13,7
10/7/88	5,3					
11/7/88	5,3	-2,00	-6,9	3,743	-0,07	9,1
17/7/88	4,2	1,70	-9,1	2,966	0,05	-22,7
18/7/88	22,6	8,24	28,7	15,960	1,32	-37,22
19/7/88	3,3	0,77	-2,3	2,331	0,02	-8,46
21/7/88	4,8	-1,86	-12,6	3,390	-0,06	2,28
22/7/88	8,2	-2,58	1,5	5,791	-0,15	22,14
6/8/88	9,3	7,50	29,6	6,568	0,49	-30,4
12/8/88	3,1	7,00	28,5	2,189	0,15	-27,5
13/8/88	2	8,20	34,5	1,412	0,12	-31,1
14/8/88	10,4	-1,50	39,1	7,345	-0,11	51,1
16/8/88	38,1	1,00	29,5	26,907	0,27	21,5
23/8/88	5,5	5,76	33,3	3,884	0,22	-12,78
24/8/88	7	6,82	30	4,944	0,34	-24,56
26/8/88	0,8	6,00	25,4	0,565	0,03	-22,6
27/8/88	2,2	7,65	28,2	1,554	0,12	-33
5/9/88	0,8	8,00	32,3	0,565		-31,7
8/9/88	1,1	8,00	32,5	0,777		-31,5
Tot/Moy	148,4	4,01	19,66	5,26	0,18	-12,42

ANNEXE 4-A.II,1 Tab.5 Isotopes des pluies de 1988

IWELEN

	Collecte	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	28/3/90	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	28/3/90			
PLUIES D'ETE	22/9/90	0,5	-2,22	-20,4
RETOMBEES SECHES D'ETE	22/9/90			

BOUS

	Collecte	P (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	27/3/90	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	27/3/90			
PLUIES D'ETE	22/9/90	2,6	8,81	36
RETOMBEES SECHES D'ETE				

TEMET

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	28/3/90	Tr.		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	28/3/90			
PLUIES D'ETE	22/9/90	5	3,7	26,4
RETOMBEES SECHES D'ETE	22/9/90			

IWELEN

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	17/5/89	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	17/5/89			
PLUIES D'ETE	24/10/89	20,9	0,19	4,1
RETOMBEES SECHES D'ETE	24/10/89			

TEMET

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	18/5/89	Tr.		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	18/5/89			
PLUIES D'ETE	25/10/89	22,3	1,5	26,2
RETOMBEES SECHES D'ETE	25/10/89			

BOUS

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	18/5/89	Tr.		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	18/5/89			
PLUIES D'ETE	25/10/89	1,2		
RETOMBEES SECHES D'ETE	25/10/89			

NORD BOUS

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	18/5/89	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	Abs.			
PLUIES D'ETE	26/10/89	1,4	9,56	24,5
RETOMBEES SECHES D'ETE	Abs.			

ANNEXE 4-A.II,1 Tab. 6 Isotopes des pluies nord Air en 1989 et 1990

IWELEN

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	Fév. 1988	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	—	—		
PLUIES D'ETE	26/10/88	8,4	1,54	5,3
RETOMBEES SECHES D'ETE	26/10/88	—		

TEMET

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	11/2/88	—		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	—	—		
PLUIES D'ETE	23/10/88	13,4		
RETOMBEES SECHES D'ETE	—	—		

BOUS

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	12/2/88	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	—	—		
PLUIES D'ETE	23/10/88	4	3,08	16,5
RETOMBEES SECHES D'ETE	—	—		

NORD BOUS

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	12/2/88	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	—	—		
PLUIES D'ETE	24/10/88	1,3		
RETOMBEES SECHES D'ETE	—	—		

ROCHER TOUBEAU

	Collecte	P mm	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
PLUIES D'HIVER	13/02/88	0		
RETOMBEES SECHES D'HIVER	—	—		
PLUIES D'ETE	24/10/88	0		
RETOMBEES SECHES D'ETE	—	—		

ANNEXE 4-A.II,1 Tab.7 Isotopes des pluies du nord de l'Air en 1988

AZEL

Date	P (mm)	pH	K (μs)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
9/7/90	3,3	5,50	84,00	5,03	0,10	7,02	1,40
10/7/90	3,1	7,67	210,00	1,31	0,94	4,40	3,36
12/7/90	4,2	5,37	113,00	0,78	3,13	3,10	3,97
13/7/90	10,8	5,28	179,00	2,07	82,82	3,40	1,64
14/7/90	2,1	5,04	76,00	1,55	33,34	4,01	2,59
20/7/90	15,1	5,66	103,00	0,58	50,33	2,15	3,71
23/7/90	1,6	7,08	237,00	3,38	0,10	14,38	4,25
28/7/90	10,4	6,03	70,00	0,43	32,50	2,26	5,26
31/7/90	33,1	5,72	60,00	0,75	28,48	1,20	1,60
3/8/90	50,8						
8/8/90	21,5	6,04	31,00	0,10	22,42	0,23	2,30
10/8/90	7,6	5,82	27,00	0,10	18,83	2,63	26,30
11/8/90	8,0						
13/8/90	1,6	6,08	75,00	0,10	28,25	4,50	45,00
15/8/90	2,0	7,13	86,00	0,79	1,60	3,32	4,20
19/8/90	2,5	7,24	98,00	1,12	1,68	4,49	4,01
6/9/90	8,6	7,43	330,00	3,83	0,10	14,82	3,87
Tot-Moy	186,3	6,21	118,60	1,46	20,31	4,79	7,56

AOUDERAS

Date	P (mm)	pH	K (μs)	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
22/5/90	1,5	8,27	830	13,59	0,61	24,90	7,08	79,31	5,84
3/7/90	6,4	8,67	491						
9/7/90	5,9	5,96	139	10,08		109,02	3,27	8,53	0,85
11/7/90	13,0	7,20	203	1,43		67,01		1,79	1,25
13/7/90	1,3	7,87	144	2,29		0,98	7,50		0,00
14/7/90	2,9	7,43	216	2,16		1,63	1,00	5,95	2,75
15/7/90	1,2	7,78	171						
16/7/90	1,9	7,25	124	2,68				6,72	2,51
20/7/90	2,9	7,25	119	1,40		1,65		2,80	2,00
22/7/90	2,5	8,91	300	1,11				3,12	2,81
24/7/90	5,4	6,80	148	2,78				4,38	1,58
28/7/90	2,4	6,82	97	2,31		39,70		5,54	2,40
31/7/90	11,4	6,52	77	3,17		33,32		2,65	0,84
3/8/90	6,4	6,65	87	2,96		20,51		1,23	0,42
10/8/90	1,0	7,21	108						
10/8/90	9,5	6,54	115	2,02				9,45	4,68
13/8/90	1,2	4,66	176	1,94		21,62		5,78	2,98
14/8/90	0,5	5,94	245	3,61		68,32		13,74	3,81
Tot-Moy	77,3	7,10	211	3,57		35,33	4,71	10,79	2,31

ANNEXE 4-A.II,2 Tab.1 Chimie des pluies du Téloua en 1990 (mg/l)

DABAGA

Date	P (mm)	pH	K (μs)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
18/5/90	2,0	6,59	753	23,2		90,1	3,88
9/7/90	6,0	6,33	198	6,61	60,5	16,7	2,53
10/7/90	8,5	2,96	394	2,47	97,5	3,47	1,40
16/7/90	5,0	6,41	142	0,86	0,21	3,15	3,66
20/7/90	7,5	3,98	114	1,84	46,0	4,17	2,27
22/7/90	5,5	4,04	112	3,15	81,4	2,62	0,83
22/7/90	9,0	4,42	192	4,31	40,4	1,63	0,38
23/7/90	21,0	4,82	57	1,17	22,3	2,43	2,08
29/7/90	2,0	4,96	106	8,63	31,9	7,14	0,83
31/7/90	10,5	3,87		3,76	52,1	1,84	0,49
9/8/90	1,2	6,96	147	4,19	0,31	18,7	4,47
13/8/90	6,0	7,12	134	0,96	0,21	4,05	4,22
14/8/90	8,3	6,81	45	0,00	17,5	0,90	
27/8/90	2,9	7,07	139	0,82	0,19	7,84	9,56
SOM/MOY	95,4	5,45	195	4,43	34,66	11,77	2,82

ABARDOK

Date	P (mm)	pH	K (μs)	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
14/7/90	13,5	7,84	375	7,59		50,2		42,4	5,59
18/7/90	2,0			220	129	91,9		112	0,51
20/7/90	2,2	5,54	142	267		269		94,3	0,35
21/7/90	2,0	8,82	191	13,3		20,1		35,8	2,70
23/7/90	5,0	5,78	148	9,05		40,9		26,2	2,89
24/7/90	8,2	8,05	294	9,85		21,0		25,2	2,55
25/7/90	2,0	6,68	150	8,85		28,7		23,8	2,69
27/7/90	1,0	4,54	168	3,99		75,1	Prés.	17,8	4,45
1/8/90	2,0	7,08	183	4,65	0,37		2,36	7,58	1,63
3/8/90	2,2	6,21	284	5,64		117	Prés.	16,4	2,90
10/8/90	1,3	2,90	559	12,6	15,1			44,0	3,51
13/8/90	1,5	5,23	159	3,85	9,63	49,3	0,07	12,4	3,23
18/8/90	1,6	7,99	682	44,5	1,64	71,7		47,2	1,06
Tot-Moy	44,5	6,39	278	46,9	31,1	75,9	1,22	38,8	2,62

ANNEXE 4-A.II,2 Tab. 2 Chimie des pluies du Téloua en 1990 (mg/l)

AZEL

Date	P (mm)	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
6/6/88	28,0						
7/6/88	26,0						
7/7/88	0,6	7,58		0,94		30,0	3,96
10/7/88	11,5	2,45		46,9		6,84	2,79
13/7/88	1,7	1,79		56,6		5,45	3,04
14/7/88	7,6	1,56	49,4	247		5,70	3,65
17/7/88	2,6	2,32		49,5		7,81	3,37
19/7/88	15,9	0,90		39,5		2,76	3,07
22/7/88	9,0	0,88		1,73		1,64	1,86
25/7/88	9,7	0,71		10,2		1,73	2,44
6/8/88	4,3	2,03		3,96	P	7,95	3,92
9/8/88	0,5	6,46		144		24,1	3,73
13/8/88	4,8	1,77		32,8		4,72	2,67
16/8/88	2,4	2,27	53,3	2,29		9,71	4,28
23/8/88	24,1	0,71	0,48	1,81		2,88	4,06
24/8/88	33,5	0,66		1,08		1,84	2,79
29/8/88	8,1						
17/9/88	1,0						
24/9/88	1,4						
Tot-Moy	192,7	2,29	34,4	45,6		8,1	3,26

AOUDERAS

Date	P (mm)	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
3/7/88	1,2						
6/7/88	0,4						
7/7/88	1,1						
8/7/88	11,7	5,34		82,7		2,90	0,54
10/7/88	5,3	0,74		28,1		0,78	1,05
11/7/88	5,3						
17/7/88	4,2	2,28		55,1		2,36	1,04
18/7/88	22,6	16,7		63,6		152	9,07
19/7/88	3,3	1,28	33,5	5,46		2,93	2,29
21/7/88	4,8	24,7				18,7	0,76
22/7/88	8,2	0,67		77,3		0,98	1,46
6/8/88	9,3	25,8		5,32	21,9	171	6,61
12/8/88	3,1						
13/8/88	2,0	24,4			4,30	161	6,59
14/8/88	10,4	34,2		63,0	8,24	183	5,37
16/8/88	38,1	19,3	5,01	93,1	21,9	166	8,63
23/8/88	5,5	21,7	0,15	54,4		166	7,63
24/8/88	7,0	17,9	2,02	43,7		145	8,07
26/8/88	0,8	15,8	0,05	45,8		121	7,64
27/8/88	2,2	18,8		48,4	12,8	143	7,60
5/9/88	0,8						
8/9/88	1,1	22,6			6,26	147	6,50
Tot-Moy	148,4	15,8	8,14	51,2	12,6	98,9	5,05

Début hivernage

Poste	Date	P (mm)	Cl ⁻	HPO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
Razel	6/6/88	36,0	14,8	34,6	0,65	29,1	1,97
Dabaga	6/6/88	40,8	10,8	P		35,6	3,30
Pe 24	1/7/88	27,5	9,9	P		19,9	2,02
Pe 34	1/7/88	40,8	15	P		48,7	3,25

ANNEXE 4-A.II,2 Tab. 3 Chimie des pluies du Téloua en1988

IWELEN

Année 1990	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
PLUIES D'HIVER	28/3	0				
RETOMBEES SECHES D'HIV	28/3	-				
PLUIES D'ETE	22/9	0,5	31,8	0	0	0,521
RETOMBEES SECHES D'ETE	22/9					0,02

TEMET

Année 1990	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
PLUIES D'HIVER	28/3	Tr.				
RETOMBEES SECHES D'HIV	28/3	-				
PLUIES D'ETE	22/9	5	7,29	0	0	14,1
RETOMBEES SECHES D'ETE	22/9					1,93

BOUS

Année 1990	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl
PLUIES D'HIVER	27/3	0				
RETOMBEES SECHES D'HIV	27/3	-				
PLUIES D'ETE	22/9	2,6	40,2	0,55	11,96	8
RETOMBEES SECHES D'ETE	-					

NORD BOUS

Année 1990	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
PLUIES D'HIVER	27/3	Trace			
RETOMBEES SECHES D'HIV		-			
PLUIES D'ETE		non rel.			
RETOMBEES SECHES D'ETE		non rel.			

ROCHER TOUBEAU

Année 1990	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
PLUIES D'HIVER	27/3	0			
RETOMBEES SECHES D'HIV	27/3	-			
PLUIES D'ETE		non rel.			
RETOMBEES SECHES D'ETE		non rel.			

ANNEXE 4-A.II,2 Tab. 4 : Chimie des pluies nord Air en 1990

IWELEN

Année 1989	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl	
PLUIES D'HIVER	17/5	0					
RETOMBEES SECHES D'HIV	17/5	p	9,92	-	6,76	1,97	0,20
PLUIES D'ETE	24/10	20,9					
RETOMBEES SECHES D'ETE	24/10	p	50,9		0,94	2,49	0,05

TEMET

Année 1989	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl	
PLUIES D'HIVER	18/5	Tr.				
RETOMBEES SECHES D'HIV	18/5	-	12,6	6,98	3,78	0,30
PLUIES D'ETE	25/10	22,3	36,4	22,7	40,6	1,12
RETOMBEES SECHES D'ETE	25/10					

NORD BOUS

Année 1989	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl	
PLUIES D'HIVER	18/5	0					
RETOMBEES SECHES D'HIV	-	-					
PLUIES D'ETE	26/10	1,4	47,8	0	13,6	57,2	1,20
RETOMBEES SECHES D'ETE	-						

IWELEN

Année 1988	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
PLUIES D'HIVER	Fév.	0				
RETOMBEES SECHES D'HIV	-	-				
PLUIES D'ETE	26/10	8,4	0	4,31	8,85	35,4
RETOMBEES SECHES D'ETE	26/10					

BOUS

Année 1988	Relevé P (mm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ /Cl	
PLUIES D'HIVER	12/2	0				
RETOMBEES SECHES D'HIV	-	-				
PLUIES D'ETE	23/10	4	57,9	0	159	2,75
RETOMBEES SECHES D'ETE	23/10					

ANNEXE 4-A.II,2 Tab. 4 : Chimie des pluies nord Air 1988 et 1989 (mg/l)

ANNEXE 4-A.II,3 CONDITION NATURELLE DES EAUX DE PLUIE (Colin, 1983; Bourdeau, 1992)

Habituellement l'eau des pluies, ayant une origine océanique ou continentale relevant de phénomènes d'évaporation - distillation, est faiblement minéralisée; son pH est compris entre "5" et "6" et sa conductivité reste souvent inférieure à 50 μ s. L'ion chlorure, comme l'ion sulfate, sont naturellement les plus abondants au dessus de l'océan, mais au fur et à mesure de la pénétration des masses d'air sur le continent, et des épisodes successifs de précipitations, leur concentration diminue et constitue donc un témoin d'existence des eaux précipitées:

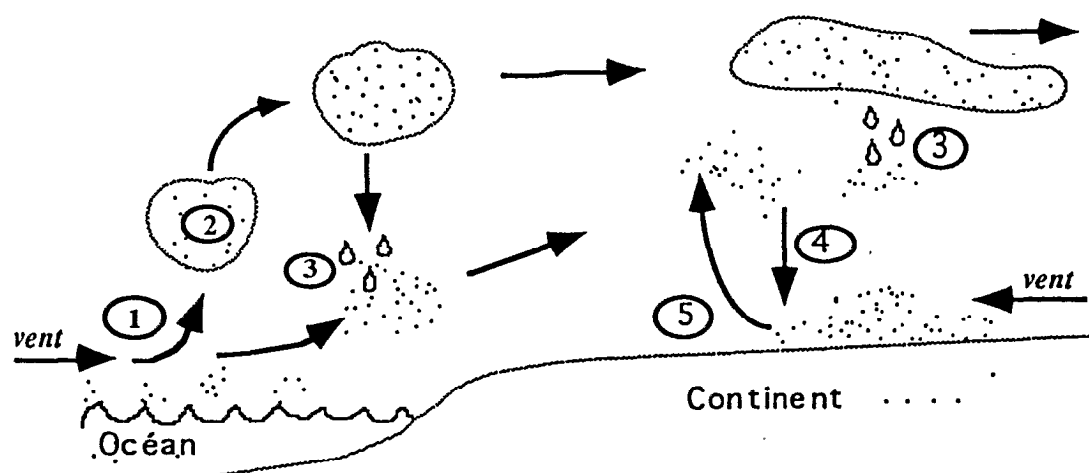
Si des apports extérieurs (pollutions industrielles ou remise en circulation sous l'action du vent et d'ascendances thermiques de sels formés à la surface des sols en région aride) ne viennent pas compenser le phénomène, la masse de vapeur d'eau qui avance sur le continent va perdre progressivement, à chaque condensation, une partie de sa réserve originelle en chlore et sulfate.

Les nitrates d'origine maritime sont rares, leur existence dans les eaux de pluie est généralement reliée à une pollution industrielle (qui n'est guère plausible dans la bande sud saharienne africaine) ou anthropique-animale par entraînement dans l'atmosphère de la matière organique prélevée à la surface du sol. Cependant les physiciens de l'atmosphère (Sisteron, 1990) signalent une production de NO atmosphérique importante en milieu tropical qui serait due au grand nombre de phénomènes orageux dont les éclairs ioniseraient les molécules d'air. A ces basses latitudes les décharges électriques entre les nuages pourraient contribuer pour plus d'un tiers de la teneur en nitrate des pluies.

Les concentrations en nitrite et phosphate dans les eaux de pluie sont rares et faibles, de l'ordre d'un facteur dix en dessous de celle des nitrates pour les nitrites. Il semble cependant que la concentration en nitrite puisse atteindre une certaine importance dans les pluies subtropicales en liaison avec des altitudes de condensation élevées. Les teneurs en phosphates ne semblent pouvoir quant-à elles être liées qu'à des phénomènes de pollution anthropique.

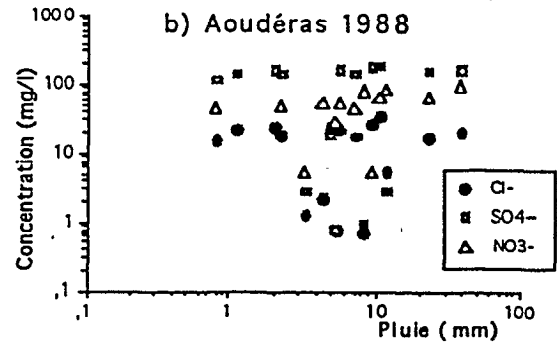
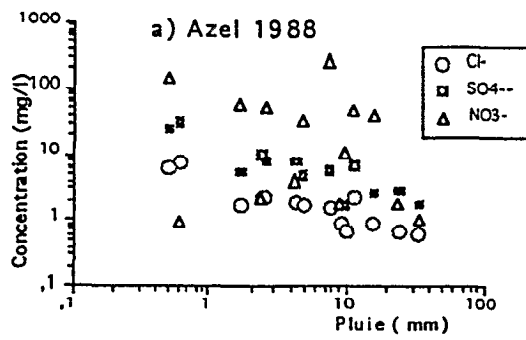
Les masses d'air humides qui parviennent à la latitude de l'Air ont effectué un trajet d'au moins deux mille kilomètres, sans être en principe marquées par une quelconque pollution industrielle. Mais les épisodes de précipitation sont très souvent précédés de forts coups de vents (tornades) qui entraînent de grandes quantités d'aérosols en suspension; lesquels sont lessivés par la pluie qui suit "*wash-out*" des anglo-saxons (figure de l'annexe 4-A.II,3 ci-après).

ANNEXE 4-A.II,3 Origine et mouvement des éléments ionisés et particulaires des masses d'air océaniques et continentales

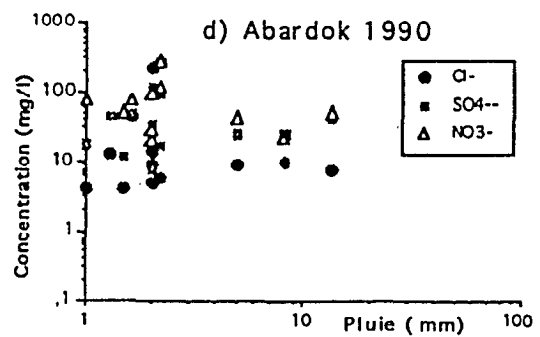
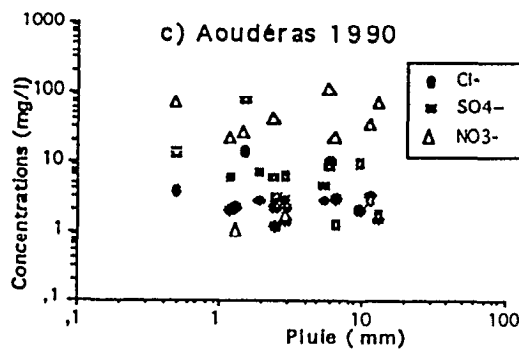
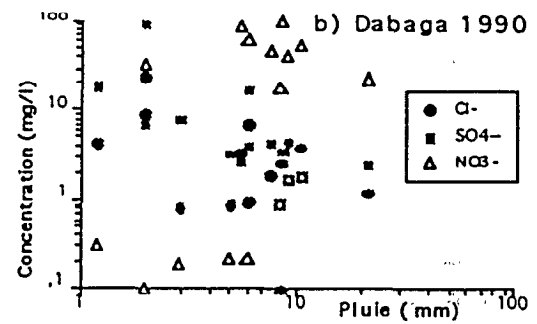
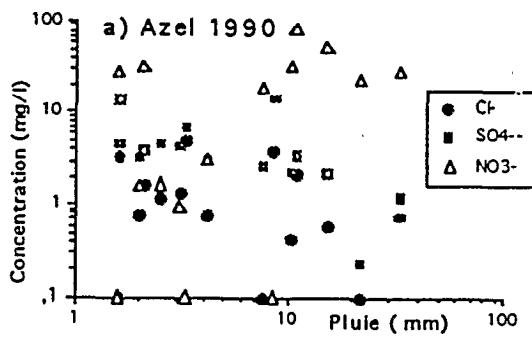


- ① Mise en suspension à partir des embruns sous l'action du vent et des ascendances de l'atmosphère.
- ② Captation des éléments à l'intérieur des nuages par les gouttelettes d'eau (*rain-out*).
- ③ Lessivage de l'atmosphère par la pluie (*wash-out*).
- ④ Retombées sèches des éléments ionisés d'origines diverses, océaniques ou continentales, sous l'effet de mouvements subsidants des masses d'air (*dry fall-out*)
- ⑤ Mise en suspension d'aérosols sous l'effet des vents et de mouvements convectifs sur le continent.

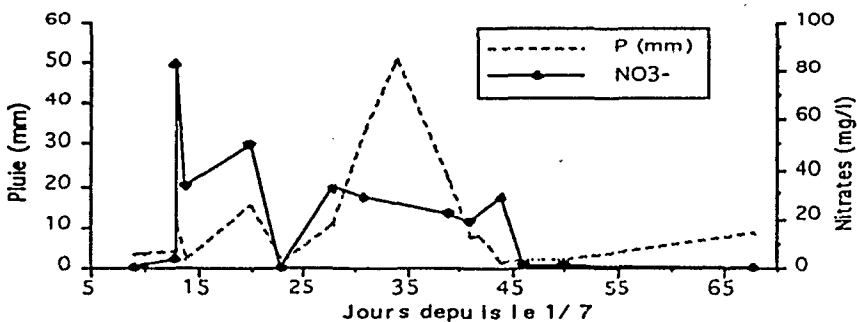
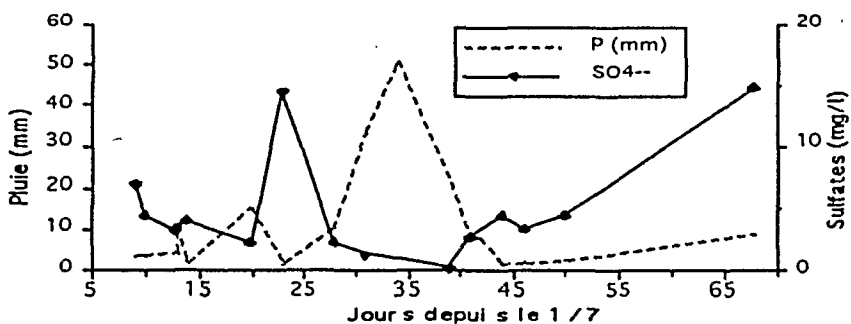
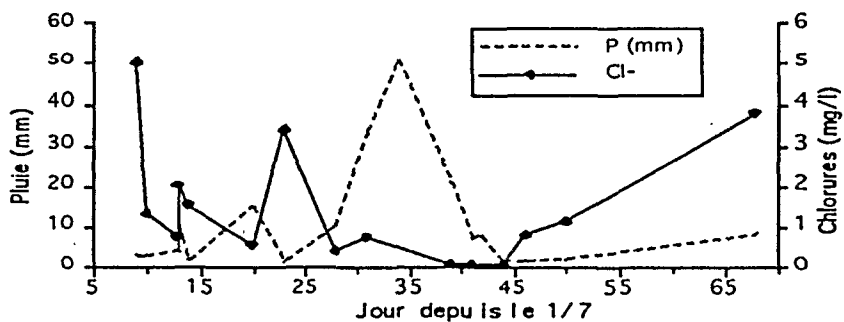
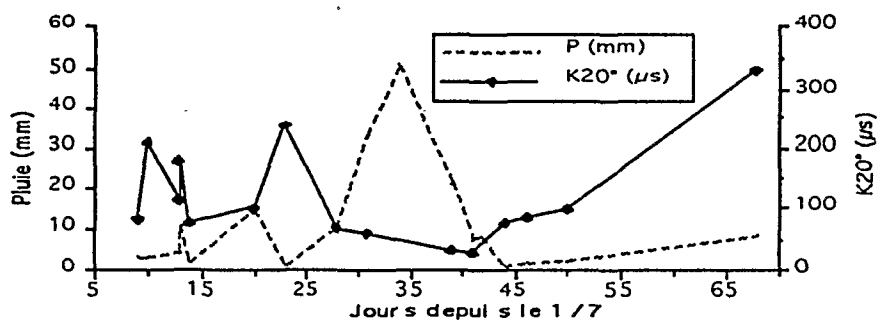
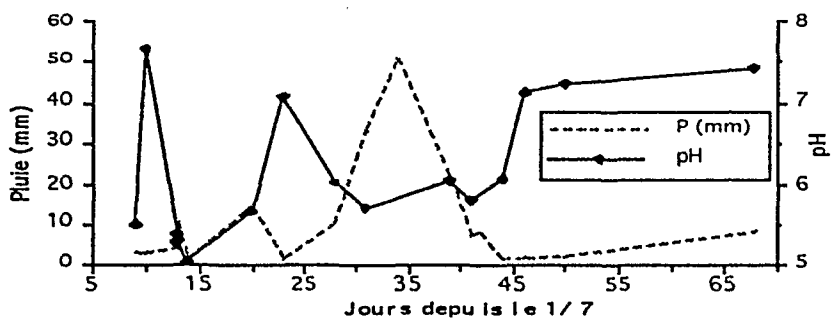
Relations en 1988



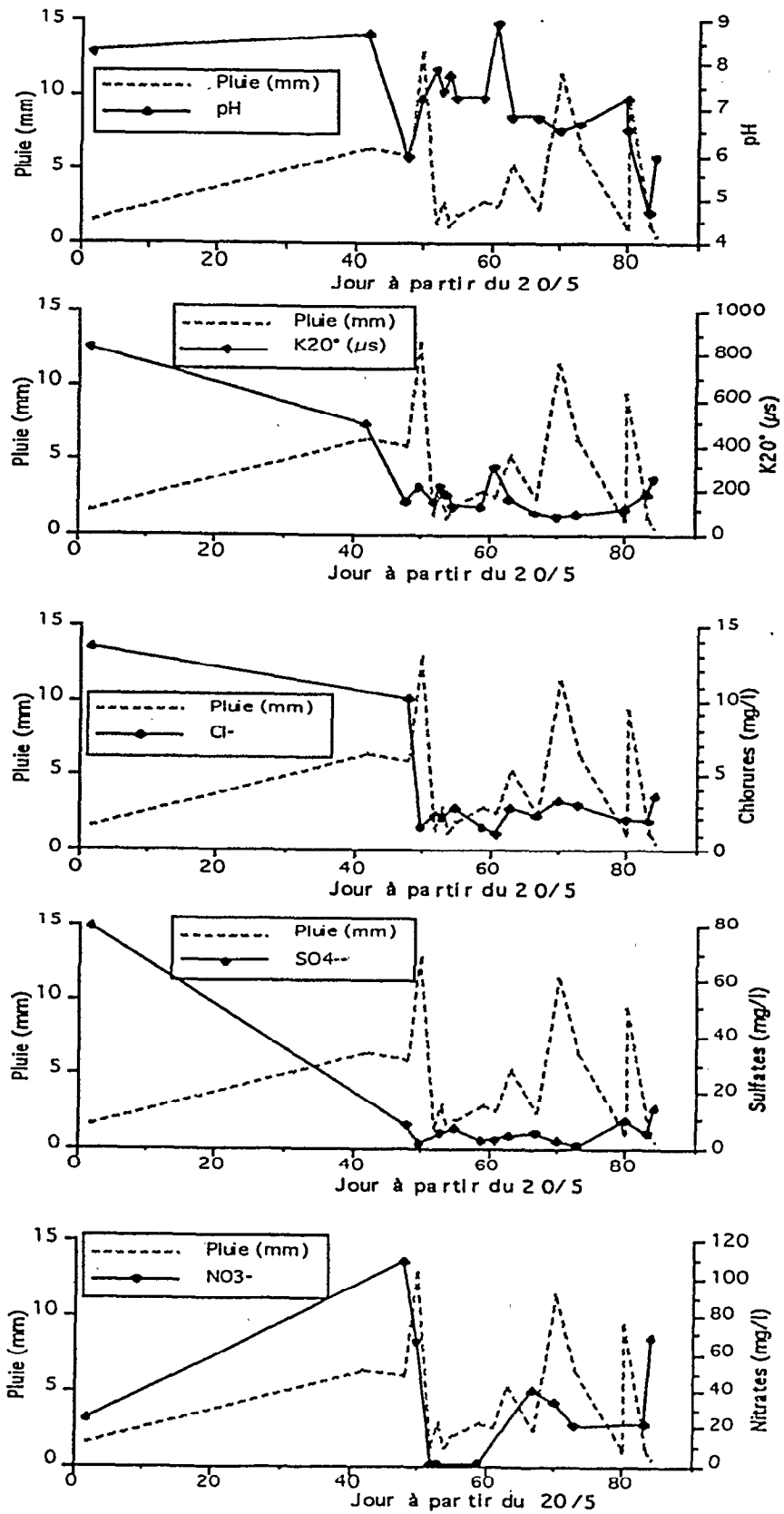
Relations en 1990



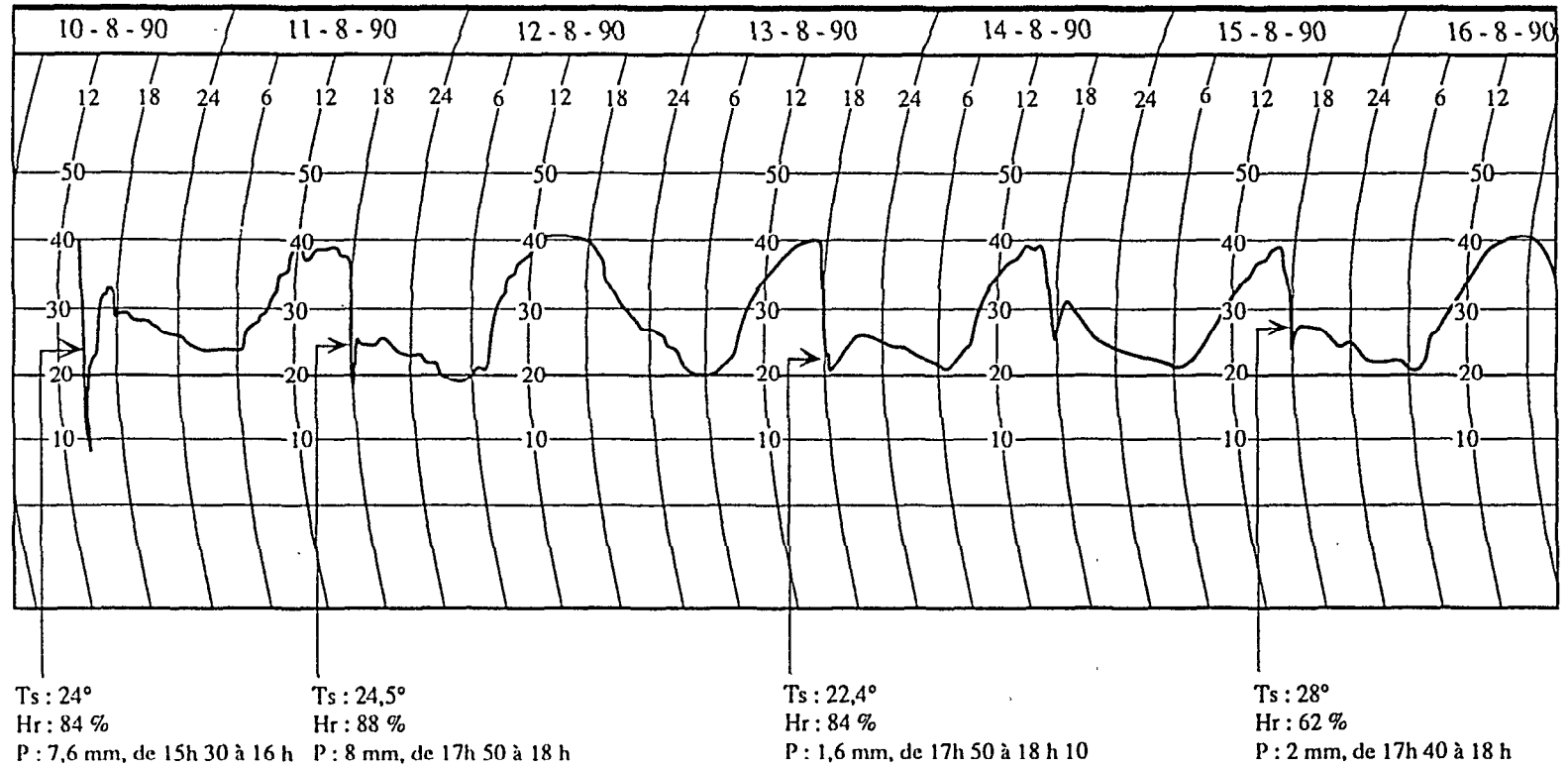
ANNEXE 4-A.II,4 Concentrations ioniques des pluies de l'Air
en fonction des quantités précipitées en 1988 et 1990



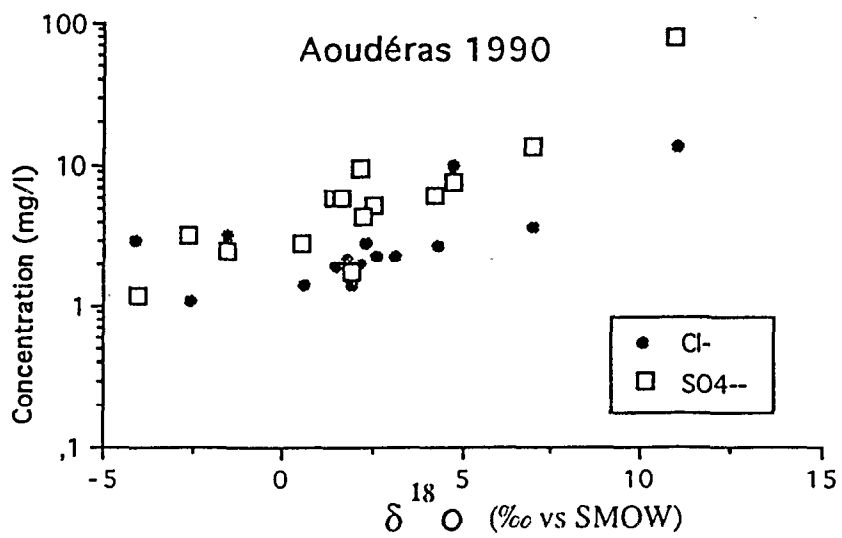
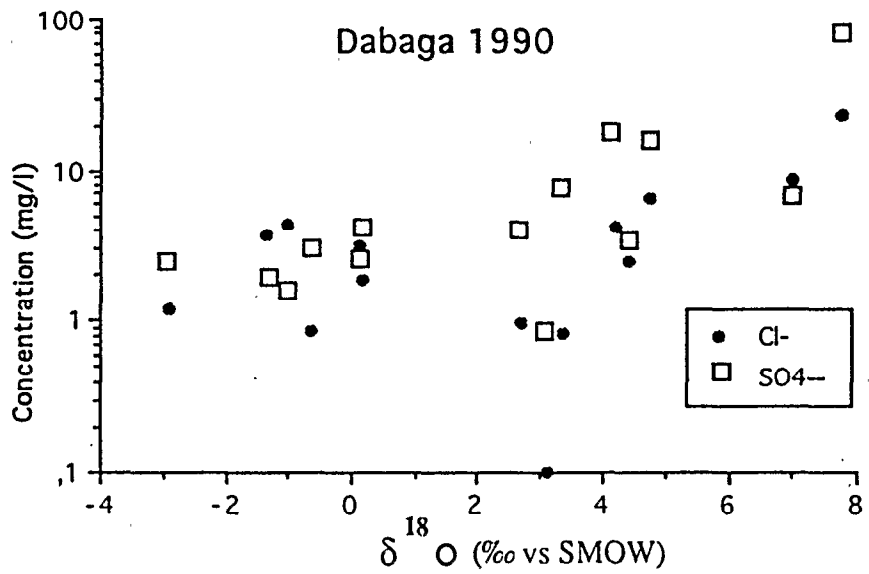
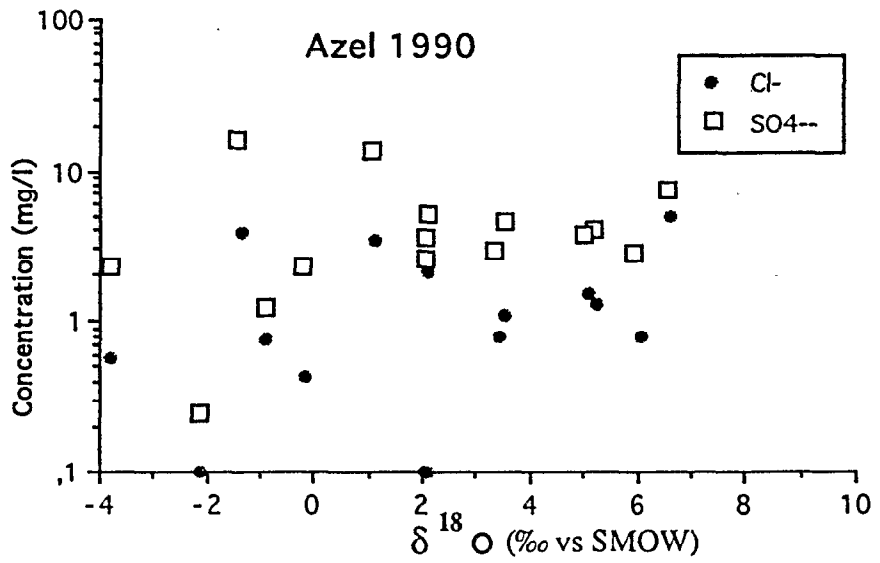
ANNEXE 4-A.II,5 Physico-chimie des pluies: Azel 1990



ANNEXE 4-A.II,6 Physico-chimie des pluies: Aoudéras 1990



ANNEXE 4-A.II,7: Températures au sol à Azel en 1990, choix des valeurs d'équilibre pour les pluies



ANNEXE 4-A.II,9 Minéralisation et oxygène 18 des pluies de l'Air en 1990

Avant le 24/7, cinq petites crues produisent 700 000 m³ Crue du 24-25/7 (3 000 000 m³) Crue du 29-31/7 (1 400 000 m³)

DATE	HEURE	Piézomètre	Piézo/Lit (cm)	T (°C)	pH	K 20° (µs)	ALC (méq/l)	T Air (°C)	Oxy-18 (‰)	Deut (‰)
26/7/90	11 h	P0	-8	29,9	6,24	127	0,60	34	-0,83	
28/7/90	17 h	P1	-22	29	6,48	132	0,80	34,7	-2,77	-23
30/7/90	18 h 50	P1	-5	30,9	8,97	197	0,95	37,2	0,59	1,1
30/7/90	19 h	P2	-139	30,9	9,01	198	0,90	37,2	0,38	-1,2
31/7/90	17 h	P1	-12	29,5	8,45	198,4	1,00		0,47	-3,4

Crue du 31/7 au 3/8 (2 100 000 m³)

5/8/90	10 h 30	P1	-31	29	6,28	85	0,85	33,7	-4,62	-30,3
7/8/90	9 h 30	P1	-49	29,8	6,3	103	0,85	33,3	-4,43	-28,1
7/8/90	9 h 40	P2	-201	30,4	6,1	138	1,05	33,3	-1,96	-16,8
8/8/90	10 h 30	P0	-10	29,5	6,39	134	1,20	36,2	-3,47	-24,7
8/8/90	10 h 30	P1	-156	30,9	6,4	155	1,40		-4,19	-26,8
8/8/90	10 h 30	P2	-205	30,5	6,15	146	1,05		-2,53	-20,4

Crues du 3-6 et 8-9 (2 200 000 m³)

10/8/90	15 h 15	P0	-10	30,7	6,18	145	1,35	33,9	-3,29	-23,2
---------	---------	----	-----	------	------	-----	------	------	-------	-------

Crue du 10-12/8 (500 000 m³)

13/8/90	18 h 30	P0	-20	28,7	6,05	135	1,25	29,1	-1,38	-13,4
13/8/90	18 h 30	P1	-35	27,7	5,85	114	1,15	29,1	-2,47	-18,1
14/8/90	18 h	P0	-6	28,0	7,8	121	1,20	26,1	-0,18	-5,2
14/8/90	18 h	P1	-45	27,2	8,2	128	1,25	26,1	-0,54	-7,1

Crues du 13-14, 14-15 et 15-16 (400 000 m³)

17/8/90	8 h 35	P1	-37	28,4	7,5	132	1,05		-0,84	-4,4
17/8/90	8 h 45	P2	-191	28,4	7,79	109	0,85		-2,43	-16,7
19/8/90	16 h 40	P1	-51	29,3	7,54	209	2,70	28,6	-2,21	-13,4
19/8/90	17 h	P2	-202	28,6	6,82	111	1,00		-2,59	-19,6

Crue du 20 (16 400 m³)

23/8/90	15 h 45	P0	-25	29,9	6,7	147	1,55	38,5	0,02	-4,4
23/8/90	15 h 45	P1	-54	30,1	6,9	289	2,70		-2,79	-18,2
23/8/90	15 h 45	P2	-193	29,4	6,34	130				
27/8/90	15 h	P0	-38	29,5	6,65	133	1,35	38,7	-0,48	-7,1
27/8/90	15 h 10	P1	-66	30,1	5,54	488	4,40		-2,15	-16,4
27/8/90	15 h 20	P2	-204	28,7	6,8	125				

Crue du 1/9 (4 800 m³)

4/9/90	18 h 45	P0	-37	30,1	6,36	142	1,05	36,1	-2,04	-21,2
4/9/90	18 h 45	P1	-65	30,6	6,25	153	1,30		-0,79	-9,4
4/9/90	18 h 45	P2	-201	29	6,12	133	1,00		-2,33	-16,4

Crue du 6 (1 700 m³)

12/9/90	17 h 45	P0	-54	31,5	6,23	143	1,30	38,8	-1,45	-14,5
12/9/90	17 h 45	P1	-86	31,5	5,96	232	3,30		-1,13	-9
12/9/90	17 h 45	P2	-220	29,2	6,1	200				
20/9/90	10 h 30	P0	-72	31	6,38	148	1,30	34,4	-1,51	-15,7
20/9/90	10 h 30	P1	-106 (sec)							
20/9/90	10 h 30	P2	-225 (eau)							

ANNEXE 4-A.III,1 : Données physico-chimiques et isotopiques de la nappe du Téloua durant l'hivernage 1990.

Avant le 24/7, cinq petites crues produisent 700 000 m³ Crue du 24-25/7 (3 000 000 m³) Crue du 29-31/7 (1 400 000 m³)

DATE	HEURE	Piézomètre	Piézo/Lit (cm)	HCO3	Cl	NO2	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na	SiO2
26/7/90	11 h	P0	-8	36,6	2,11		16,36	5,10	10,48	2,19	3,72	4,69	17,35
28/7/90	17 h	P1	-22	48,8	2,70		12,99	4,72	13,09	2,48	5,16	4,21	14,45
30/7/90	18 h 50	P1	-5	58	4,33		50,70	9,44	20,08	3,71	5,90	4,44	22,94
30/7/90	19 h	P2	-139	54,9	4,05		34,21	8,24	15,25	3,33	5,63	4,26	25,10
31/7/90	17 h	P1	-12	61	4,57		56,71	10,72	24,11	4,55	6,84	4,39	24,25

Crue du 31/7 au 3/8 (2 100 000 m³)

5/8/90	10 h 30	P1	-31	51,9	2,28		8,64	3,01	10,36	2,10	4,50	2,65	22,76
7/8/90	9 h 30	P1	-49	51,9	1,80		5,18	2,75	10,00	1,93	4,34	2,30	23,72
7/8/90	9 h 40	P2	-201	64,1	2,19		6,91	5,56	12,99	2,91	4,61	3,59	22,57
8/8/90	10 h 30	P0	-10	73,2	3,18		7,11	3,48	14,77	2,81	4,50	3,68	15,51
8/8/90	10 h 30	P1	-156	85,4	9,47		5,21	5,49	15,51	3,38	8,64	5,45	23,59
8/8/90	10 h 30	P2	-205	64,1	5,52		7,14	4,84	13,25	2,92	4,46	5,64	22,29

Crues du 3-6 et 8-9 (2 200 000 m³)

10/8/90	15 h 15	P0	-10	82,4	1,90		6,26	3,30	15,79	3,02	4,54	3,15	14,00
---------	---------	----	-----	------	------	--	------	------	-------	------	------	------	-------

Crue du 10-12/8 (500 000 m³)

13/8/90	18 h 30	P0	-20	76,3	2,01		7,79	3,62	14,77	2,70	4,42	2,83	16,43
13/8/90	18 h 30	P1	-35	70,2	9,45		5,18	3,02					
14/8/90	18 h	P0	-6	73,2	1,27		19,54	2,13					
	18 h	P1	-45	76,3	1,18		18,93	2,02					

Crues du 13-14, 14-15 et 15-16 (400 000 m³)

17/8/90	8 h 35	P1	-37	64,1	3,43		15,74	4,42	13,367	2,651	4,340	2,024	16,94
17/8/90	8 h 45	P2	-191	51,9	2,80		11,94	4,65	9,960	2,323	3,754	2,944	16,55
19/8/90	16 h 40	P1	-51	165	12,8		19,64	2,35	27,415	7,442	16,383	10,235	25,70
19/8/90	17 h	P2	-202	61	3,06		16,65	6,20	13,788	2,931	4,497	4,945	24,14

Crue du 20 (16400 m³)

23/8/90	15 h 45	P0	-25	94,6	5,05		13,41	2,79	16,633	2,943	6,061	6,992	19,36
23/8/90	15 h 45	P1	-54	165	8,20			5,03	22,785	10,506	16,891	7,130	23,65
23/8/90	15 h 45	P2	-193										
27/8/90	15 h	P0	-38	82,4	5,48	1,83	25,47	4,81	18,537	3,405	5,630	5,221	19,65
27/8/90	15 h 10	P1	-66	268	10,4		15,63	1,46	38,597	16,732	30,772	5,658	21,69
27/8/90	15 h 20	P2	-204										

Crue du 1/9 (4 800 m³)

4/9/90	18 h 45	P0	-37	64,1	2,94		19,57	5,14	16,012	2,918	4,692	5,083	21,80
4/9/90	18 h 45	P1	-65	79,3	3,32		17,89	3,66	16,834	4,086	7,351	3,266	20,87
4/9/90	18 h 45	P2	-201	61	4,81	2,14	24,89	3,30	14,830	3,271	0,504	4,439	26,13

Crue du 6 (1 700 m³)

12/9/90	17 h 45	P0	-54	79,3	3,23		15,95	5,18	16,212	3,271	9,775	5,635	23,46
12/9/90	17 h 45	P1	-86	201	6,69		28,28	1,82	24,088	9,521	39,647	4,439	22,04
12/9/90	17 h 45	P2	-220										
20/9/90	10 h 30	P0	-72	79,3	5,03	0,235	16,34	7,48	18,176	3,648	5,044	3,128	24,52
20/9/90	10 h 30	P1	-106 (sec)										
20/9/90	10 h 30	P2	-225 (eau)										

ANNEXE 4-A.III,2 : Concentrations en mg/l des différents éléments dans l'eau de la nappe du Téloua en 1990.

Avant le 24/7, cinq petites crues produisent 700 000 m³

Crue du 24-25/7 (3 000 000 m³)

Crue du 29-31/7 (1 400 000 m³)

DATE	HEURE	Piézo	Prof	HCO3	Cl	NO2	NO3	SO4	Σ Ani.	ΣA-NO3	Ca	Mg	K	Na	Σ Cat.	Bal. %	Bal-NO3
26/7/90	11 h	P0	-8	0,60	0,059	0,264	0,212		1,14	0,87	0,524	0,182	0,095	0,204	1,006	-12	14
28/7/90	17 h	P1	-22	0,80	0,076	0,210	0,197		1,28	1,07	0,654	0,206	0,132	0,183	1,176	-9	9
30/7/90	18 h 50	P1	-5	0,95	0,122	0,807	0,197		2,076	1,269	1,004	0,309	0,151	0,193	1,657	-22	27
30/7/90	19 h	P2	-139	0,90	0,114	0,551	0,172		1,737	1,186	0,763	0,278	0,144	0,185	1,370	-24	14
31/7/90	17 h	P1	-12	1,00	0,129	0,889	0,223		2,242	1,352	1,205	0,379	0,175	0,191	1,951	-14	36

Crue du 31/7 au 3/8 (2 100 000 m³)

5/8/90	10 h 30	P1	-31	0,85	0,064	0,142	0,063		1,119	0,977	0,518	0,175	0,115	0,115	0,924	-19	-6
7/8/90	9 h 30	P1	-49	0,85	0,051	0,090	0,057		1,048	0,958	0,500	0,161	0,111	0,1	0,872	-18	-9
7/8/90	9 h 40	P2	-201	1,05	0,062	0,113	0,116		1,341	1,228	0,649	0,242	0,118	0,156	1,166	-14	-5
8/8/90	10 h 30	P0	-10	1,20	0,090	0,115	0,072		1,477	1,362	0,738	0,234	0,115	0,16	1,248	-17	-9
8/8/90	10 h 30	P1	-156	1,40	0,267	0,084	0,114		1,866	1,782	0,776	0,282	0,222	0,237	1,516	-21	-16
8/8/90	10 h 30	P2	-205	1,05	0,156	0,115	0,101		1,422	1,306	0,662	0,243	0,114	0,245	1,265	-12	-3

Crues du 3-6 et 8-9 (2 200 000 m³)

10/8/90	15 h 15	P0	-10	1,35	0,054	0,101	0,069		1,573	1,472	0,790	0,251	0,116	0,137	1,294	-19	-13
---------	---------	----	-----	------	-------	-------	-------	--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----

Crue du 10-12/8 (500 000 m³)

13/8/90	18 h 30	P0	-20	1,25	0,057	0,126	0,075		1,508	1,382	0,738	0,225	0,113	0,123	1,200	-23	-14
13/8/90	18 h 30	P1	-35	1,15	0,266	0,084	0,063										
14/8/90	18 h	P0	-6	1,20	0,036	0,315	0,044										
	18 h	P1	-45	1,25	0,033	0,305	0,042										

Crues du 13-14, 14-15 et 15-16 (400 000 m³)

17/8/90	8 h 35	P1	-37	1,05	0,097	0,270	0,092		1,509	1,239	0,668	0,221	0,111	0,088	1,089	-32	-13
17/8/90	8 h 45	P2	-191	0,85	0,079	0,204	0,097		1,230	1,026	0,498	0,194	0,096	0,128	0,916	-29	-11
19/8/90	16 h 40	P1	-51	2,70	0,361	0,337	0,049		3,447	3,110	1,371	0,620	0,420	0,445	2,856	-19	-9
19/8/90	17 h	P2	-202	1,00	0,086	0,277	0,129		1,492	1,215	0,689	0,244	0,115	0,215	1,264	-17	4

Crue du 20 (16 400 m³)

23/8/90	15 h 45	P0	-25	1,55	0,143	0,225	0,058		1,976	1,751	0,832	0,245	0,155	0,304	1,536	-25	-13
23/8/90	15 h 45	P1	-54	2,70	0,231	0,001	0,105		3,037	3,036	1,139	0,876	0,433	0,31	2,758	-10	-10
23/8/90	15 h 45	P2	-193														
27/8/90	15 h	P0	-38	1,35	0,155	0,039	0,247	0,100	1,892	1,644	0,927	0,284	0,144	0,227	1,582	-18	-4
27/8/90	15 h 10	P1	-66	4,40	0,294	0,205	0,031		4,929	4,724	1,930	1,394	0,789	0,246	4,359	-12	-8
27/8/90	15 h 20	P2	-204														

Crue du 1/9 (4 800 m³)

4/9/90	18 h 45	P0	-37	1,05	0,083	0,301	0,107		1,541	1,240	0,801	0,243	0,120	0,221	1,385	-11	11
4/9/90	18 h 45	P1	-65	1,30	0,094	0,271	0,076		1,740	1,470	0,842	0,341	0,188	0,142	1,513	-14	3
4/9/90	18 h 45	P2	-201	1,00	0,136	0,046	0,287	0,069	1,538	1,251	0,742	0,273	0,013	0,193	1,220	-23	-3

Crue du 6 (1 700 m³)

12/9/90	17 h 45	P0	-54	1,30	0,091	0,231	0,108		1,730	1,499	0,811	0,273	0,251	0,245	1,579	-9	5
12/9/90	17 h 45	P1	-86	3,30	0,189	0,434	0,038		3,961	3,527	1,204	0,793	1,017	0,193	3,207	-21	-9
12/9/90	17 h 45	P2	-220														
20/9/90	10 h 30	P0	-72	1,30	0,142	0,005	0,188	0,156	1,791	1,603	0,909	0,304	0,129	0,136	1,478	-19	-8
20/9/90	10 h 30	P1	-106 (sec)														
20/9/90	10 h 30	P2	-225 (eau)														

ANNEXE 4-A.III,3 : Concentrations en méq/l et balances ioniques des eaux de la nappe du Téloua en 1990.

Crue du 25 au 27/7/1988

T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	Oxy-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (méq/l)
1	18,4	24,6	8,13	147	-2,18	11,0	1,30
17	14,9	24,5	8,73	130	-1,68		1,25
27	9,50	24,5	8,41	128	-0,57	9,6	1,10
50	14,9	24,3	8,33	144	-1,91		1,20
59	18,4	24,4	8,22	153	-2,31		1,25
84	22,2	24,3	8,23	148	-0,38		1,25
104	204	24,4	8,32	165	-1,70		1,30
109	239	24,3	7,74	160	-1,46	3,0	1,35
111	251	24,3	8,13	151	-1,84		1,50
116	264	24,6	8,32	153			
124	276	24,3	8,14	153	-2,01		1,30
129	293	24,5	8,12	146			
134	310	24,5	7,95	133	-2,71	-1,9	1,10
153	335	24,4	8,15	145			
157	360	24,3	8,16	135	-2,95	-3,2	1,10
190	310	24,0	8,24	127	-2,07		1,05
214	293						
224	286						
250	310	24,0	8,10	128	-2,40		1,05
260	393						
305	310	24,1	7,76	124	-1,95		0,85
321	276	24,0	8,15	116	-3,19		0,95
329	251	24,1	8,82	126	-2,96	-5,6	1,00
335	227	24,1	8,81	113	-1,67		0,95
340	204	24,0	8,96	118	-2,50		0,85
346	183	23,9	9,19	127	-2,15		0,80
353	162	23,8	9,10	124	-3,06	-18,4	0,95
362	144	23,8	9,99	118	-1,98		0,95
372	127	24,1	9,88	113	-2,78		0,90
384	112	23,9	8,27	117	-2,92		0,90
402	96,6	23,9		114	-2,77		0,90
424	81,1	23,8		118	-2,99		0,85
469	66,9	23,9		119	-2,98	-8,4	0,85
522	53,4	23,8	7,79	120	-2,71	-8,5	0,95
821	41,7	23,5	7,94	121	-2,83		0,95
1074	22,2	26,7	7,55	110	-3,01	-20,8	0,85
1257	14,9	29,4	7,50	110	-3,09	-17,9	0,80
1462	9,50	28,9	7,77	99	-2,99		0,80
1654	5,99	26,8	7,83	98	-2,24	-13,3	0,75
2154	1,95	23,9	8,13	96	-1,65	-2,9	0,75
2662	0,37	34,1	7,86	102	-1,67		0,85
3086	0,00	28,5	8,27	115	-0,93		0,90

Crue du 16 au 21/8/1988

T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	Oxy-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (méq/l)
0	9,50	25,0	8,12	97	1,26	-12,4	1,05
400	8,60	29,7	8,23	77	1,22		0,80
582	5,40	33,3	8,14	77	1,03		0,80
723	7,00	28,7	8,37	78	1,13		0,80
757	8,60	28,0	7,92	73	1,22		0,80
808	144	26,4	7,97	78	3,56		1,15
812	227	25,6	7,98	71	4,40		1,35
815	276	25,7	7,90	69	4,82		1,15
822	310	25,5	7,93	68	5,03	-30,5	1,25
837	360	24,7	7,92	72	5,24		1,15
854	425	29,9	8,10	147	5,45	-27,6	0,95
883	360	30,4	8,24	144	5,24		1,00
907	276	31,2	8,15	144	4,82	-22,1	0,95
989	360	24,4	8,27	133	5,24	-22,6	0,95
1144	276	23,9	8,16	146	4,82	-20,6	0,95
1149	251	23,9	7,96	149	4,61		0,90
1160	227	23,9	7,92	151	4,40	-28,6	
1169	204	23,9	7,97	152	4,19		0,95
1178	183	23,9	7,95	153	3,98	-10,7	0,95
1185	162	23,9	7,96	137	3,77		
1195	144	23,8	7,97	158	3,56	-25,6	0,85
1208	127	23,8	8,12	153	3,35		0,90
1219	112	24,0	8,20	156	3,14	-24,4	0,90
1235	96,6	23,8	8,27	146	2,94		
1251	81,1	23,8	8,23	141	2,73	-18,2	
1329	66,9	23,7	8,37	184	2,52		0,80
1674	41,7	24,9	8,16	103	2,10	-25,0	0,90
2104	22,2	27,3	8,24	68	1,68		0,70
2849	9,50	24,1	8,18	74	1,26		0,80
4768	3,42	31,5	8,04	118	0,86		0,75
7548	0,30	32,9	8,28	108	0,42		0,85

ANNEXE 4-A.III,4 : physico-chimie des écoulements du Téloua en 1988

T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	Oxy-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (méq/l)
0	14,9	26,10	8,25	33	-4,27	-4,0	1,20
26	9,50	25,60	8,20	39	-4,10	-13,8	1,00
35	5,70	25,60	8,95	43	-5,17	-36,5	0,90
139	1,40	24,30	7,76	53	-4,72	-11,3	0,80
223	66,9	25,00	7,72	81	-4,42	-30,7	1,70
228	144	25,30	7,68	73	-5,05	-5,9	1,50
231	204	25,30	7,73	74	-5,14	-18,7	1,60
269	183	25,00	7,74	66	-5,85	-44,8	1,05
279	162	24,90	7,63	66	-4,78	-8,4	0,95
298	144	24,70	7,71	65	-5,07	-18,0	1,00
348	162	24,80	7,78	63	-5,61	-24,2	0,95
370	183	24,70	7,78	63	-5,35	-51,6	0,95
419	162	24,20	7,86	66	-4,83		0,90
428	144	24,20	7,30	66	-4,99	-33,2	0,85
441	127	24,10	7,90	66	-4,62		0,85
448	112	24,10	7,95	68	-3,65		0,80
465	96,6	24,00	7,97	68	-4,90	-25,0	0,75
473	81,1	24,00	8,06	69	-4,80		0,85
490	66,9	24,00	7,95	70	-4,81		0,95
511	53,4	23,90	7,96	69	-4,41	-24,2	0,85
579	41,7	23,80	7,76	71	-4,25	-12,2	0,75
1096	20,7						
1097	22,2	26,20	7,83	81	-4,25		0,75
1430	96,6	25,50	8,28	42	-7,18		0,90
1446	81,1	25,40	7,96	47	-6,07		0,70
1451	96,6						
1465	81,1						
1486	66,9						
1511	74,0						
1512	144	25,40	7,95	43	-5,69		0,80
1514	162	25,60	7,96	73	-6,12		0,95
1517	183	25,50	7,92	44	-6,19		0,80
1530	162	26,30	7,85	52	-5,84		0,80
1550	144	26,30	7,75	56	-5,93		0,80
1561	127	26,20	7,75	56	-5,84		0,80
1568	112	26,10	8,15	56	-6,08		0,80
1580	96,6	26,00	8,10	56	-6,84		0,80
1588	81,1	25,90	8,13	57	-6,93		0,90
1597	66,9	25,80	8,16	57	-6,90		0,90
1611	53,4	25,70	8,12	57			0,80
1635	41,7	25,50	8,13	60	-7,05		1,05
1792	22,2	25,30	8,28	68	-3,82		0,80
2262	7,35	24,20	7,75	81	-3,96		0,65
3757	3,42	25,10	7,55	94			1,20

ANNEXE 4-A.III,5 : Données physico-chimiques et isotopiques des écoulements du Téloua des 23 au 26/8/1988

T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K 20° (μs)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻⁻ (mg/l)	SiO ₂	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
1	18,4	24,6	8,13	147	1,30	1,21	1,20	2,90	16,60	22,75	3,54	1,28	3,92
17	14,9	24,5	8,73	130	1,25	1,84	0,00	2,10	16,40	20,80	3,17	1,62	4,20
27	9,5	24,5	8,41	128	1,10	2,08	0,90	2,60	16,30	19,65	2,98	1,70	4,16
50	14,9	24,3	8,33	144	1,20	1,75	0,70	3,10	18,20	21,45	3,28	1,94	4,44
59	18,4	24,4	8,22	153	1,25	2,72	1,90	2,70	18,20	21,55	3,52	2,49	4,75
84	22,2	24,3	8,23	148	1,25	0,87	1,70	2,40	18,90	18,60	3,26	1,14	4,29
104	204	24,4	8,32	165	1,30	1,71	2,10	5,40	19,70	27,90	4,48	1,89	4,91
109	239	24,3	7,74	160	1,35	1,99	1,60	5,30	18,50	23,00	3,91	2,32	4,50
111	251	24,3	8,13	151	1,50	1,63	1,70	3,90	19,10	25,95	4,25	1,80	4,69
116	264	24,6	8,32	153									
124	276	24,3	8,14	153	1,30	2,71	0,30	3,40	18,10	22,20	3,55	2,47	4,26
129	293	24,5	8,12	146									
134	310	24,5	7,95	133	1,10	1,44	1,50	3,70	18,40	20,80	3,30	1,79	3,99
153	335	24,4	8,15	145									
157	360	24,3	8,16	135	1,10	1,74	1,00	2,70	17,30	18,65	3,13	2,04	4,10
190	310	24,0	8,24	127	1,05	2,36	1,40	4,60	17,80	17,05	2,99	2,67	4,30
214	293												
224	286												
250	310	24,0	8,10	128	1,05	1,37	0,50	3,00	16,30	17,40	3,01	1,91	4,16
260	393												
305	310	24,1	7,76	124	0,85	1,37	0,60	2,80	18,10	16,25	2,78	1,67	3,94
321	276	24,0	8,15	116	0,95	1,57	0,40	2,80	19,40	17,00	2,95	1,90	4,28
329	251	24,1	8,82	126	1,00	1,53	1,00	3,40	17,20	17,00	2,93	1,89	4,08
335	227	24,1	8,81	113	0,95	1,38	0,80	2,70	16,40	15,45	2,66	1,77	3,84
340	204	24,0	8,96	118	0,85								
346	183	23,9	9,19	127	0,80	1,55	1,30	3,40	14,80	16,60	2,88	1,93	4,34
353	162	23,8	9,10	124	0,95								
362	144	23,8	9,99	118	0,95								
372	127	24,1	9,88	113	0,90	2,32	0,00	2,90	16,00	14,90	2,50	2,51	3,90
384	112	23,9	8,27	117	0,90	2,32	0,50	3,40	16,70	15,95	2,77	2,58	4,17
402	96,6	23,9		114	0,90								
424	81,1	23,8		118	0,85								
469	66,9	23,9		119	0,85	2,59	0,10	3,40	15,70	15,75	2,65	2,77	4,16
522	53,4	23,8	7,79	120	0,95	2,63	0,20	3,20	16,80	16,05	2,71	2,83	4,32
821	41,7	23,5	7,94	121	0,95								
1074	22,2	26,7	7,55	110	0,85	2,34	0,60	2,90	15,20	14,00	2,35	2,94	3,92
1257	14,9	29,4	7,50	110	0,80								
1462	9,50	28,9	7,77	99	0,80	2,78	0,20	2,60	14,70	11,60	1,97	2,94	3,75
1654	5,99	26,8	7,83	98	0,75								
2154	1,95	23,9	8,13	96	0,75	1,44	0,00	2,20	12,10	11,10	1,72	2,13	4,02
2662	0,37	34,1	7,86	102	0,85								
3086	0,00	28,5	8,27	115	0,90	1,69	0,20	2,90	16,60	14,75	2,08	2,18	4,13

ANNEXE 4-A.III,6 Chimie des écoulements de la crue du 25 au 27/7/88

16-21	T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K 20° (µs)	HCO ₃ ⁻ (mécq/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SiO ₂	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
	0	9,50	25,0	8,12	97	1,05	2,04	1,80	3,60	16,80	18,40	3,05	2,32	4,06
	400	8,60	30,0	8,23	77	0,80	2,92	1,10	2,60	19,10	14,45	2,36	2,78	3,88
	582	5,40	33,0	8,14	77	0,80	1,55	0,00	2,00	16,90	12,20	2,06	1,60	3,45
	723	7,00	29,0	8,37	78	0,80	1,70	0,20	3,40	17,20	12,95	2,20	1,49	3,65
	757	8,60	28,0	7,92	73	0,80	2,16	0,40	3,00	16,40	12,85	2,17	1,43	3,43
	808	144	26,0	7,97	78	1,15	1,59	0,80	4,50	20,30	19,85	3,42	1,71	3,59
	812	227	26,0	7,98	71	1,35	1,44	1,10	3,80	18,90	22,05	4,08	1,70	3,73
	815	276	26,0	7,90	69	1,15	1,99	1,00	4,60	21,00	20,60	3,50	1,63	3,59
	822	310	26,0	7,93	68	1,25								
	837	360	25,0	7,92	72	1,15	2,18	2,10	4,90	21,10	20,15	3,86	2,79	3,96
	854	425	30,0	8,10	147	0,95	1,61	0,00	3,20	17,90	19,60	3,56	2,94	4,34
	883	360	30,0	8,24	144	1,00								
	907	276	31,0	8,15	144	0,95	1,28	0,60	2,50	19,50	13,80	2,69	2,41	3,51
	989	360	24,0	8,27	133	0,95	1,69	0,00	3,00	19,80	15,55	2,96	1,94	3,55
	1144	276	24,0	8,16	146	0,95	1,71	0,00	2,80	18,60	14,00	2,76	2,36	3,59
	1149	251	24,0	7,96	149	0,90								
	1160	227	24,0	7,92	151		1,81	0,70	4,10	18,90	15,00	2,83	2,47	3,78
	1169	204	24,0	7,97	152	0,95								
	1178	183	24,0	7,95	153	0,95	2,67	1,90	7,00	18,20	14,90	2,86	2,49	3,83
	1185	162	24,0	7,96	137									
	1195	144	24,0	7,97	158	0,85	1,88	1,00	3,90	17,10	13,80	2,46	4,91	3,55
	1208	127	24,0	8,12	153	0,90								
	1219	112	24,0	8,20	156	0,90	1,75	0,40	4,10	18,70	14,70	2,72	2,87	4,06
	1235	97,0	24,0	8,27	146									
	1251	81,0	24,0	8,23	141		1,69	1,00	3,80	18,00	13,90	2,58	2,78	3,75
	1329	67,0	24,0	8,37	184	0,80	1,44	0,00	3,30	15,40	12,55	2,17	2,56	3,35
	1674	42,0	25,0	8,16	103	0,90	1,25	0,50	1,70	18,60	13,70	2,58	2,24	3,56
23-24														
	0	14,9	26,1	8,25	33	1,20	1,15	0,00	1,60	17,80	17,65	2,84	0,83	2,85
	26	9,50	25,6	8,20	39	1,00	0,86	0,30	1,70	17,70	18,95	2,97	1,00	3,14
	35	5,70	25,6	8,95	43	0,90	1,18	0,40	2,10	13,00	14,90	2,57	0,96	3,06
	139	1,40	24,3	7,76	53	0,80	1,74	1,40	4,70	13,60	9,05	1,60	1,01	3,54
	223	66,9	25,0	7,72	81	1,70	1,56	1,10	4,10	17,90	27,05	4,92	2,34	4,68
	228	144	25,3	7,68	73	1,50	1,81	0,40	4,30	18,60	23,35	4,27	2,12	4,13
	231	204	25,3	7,73	74	1,60	1,43	0,00	2,80	20,90	26,40	4,97	2,28	4,47
	269	183	25,0	7,74	66	1,05	1,48	1,10	4,70	16,10	16,50	3,07	1,96	3,56
	279	162	24,9	7,63	66	0,95	1,49	0,70	3,60	16,70	15,50	2,72	1,94	3,38
	298	144	24,7	7,71	65	1,00	1,53	0,00	3,80	18,70	15,60	2,87	1,96	3,43
	348	162	24,8	7,78	63	0,95	1,76	0,50	4,50	18,30	14,75	2,70	2,18	3,47
	370	183	24,7	7,78	63	0,95	1,67	0,50	4,70	15,30	12,10	2,08	2,34	3,25
	419	162	24,2	7,86	66	0,90								
	428	144	24,2	7,30	66	0,85	1,76	1,70	5,70	15,90	13,55	2,29	2,36	3,69
	441	127	24,1	7,90	66	0,85								
	448	112	24,1	7,95	68	0,80	1,84	1,80	5,50	16,20	13,45	2,30	2,32	3,68
	465	96,6	24,0	7,97	68	0,75								
	473	81,1	24,0	8,06	69	0,85	1,87	0,40	4,20	15,40	12,00	2,10	2,24	3,65
	490	66,9	24,0	7,95	70	0,95								
	511	53,4	23,9	7,96	69	0,85	1,94	0,50	4,60	15,30	11,95	2,15	2,25	3,65
	579	41,7	23,8	7,76	71	0,75	1,90	2,10	5,60	15,10	12,95	2,25	2,22	3,60
	1096	20,7												
	1097	22,2	26,2	7,83	81	0,75	3,41	1,40	6,10	15,10	12,45	2,08	3,37	4,18

ANNEXE 4-A.III.7 Chimie des écoulements de la crue des 16-21 et 23-24/88

T(mn)	Q(m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ ANIONS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ CATIONS	Balance(%)
1	18,4	1,300	0,034	0,019	0,060	1,414	1,138	0,295	0,056	0,101	1,589	11,6
17	14,9	1,250	0,052	0,000	0,044	1,346	1,040	0,264	0,070	0,108	1,482	9,7
27	9,50	1,100	0,059	0,015	0,054	1,227	0,983	0,248	0,074	0,107	1,411	14,0
50	14,9	1,200	0,049	0,011	0,065	1,325	1,073	0,273	0,084	0,114	1,544	15,3
59	18,4	1,250	0,077	0,031	0,056	1,414	1,078	0,293	0,108	0,122	1,601	12,4
84	22,2	1,250	0,025	0,027	0,050	1,352	0,930	0,272	0,050	0,110	1,361	0,7
104	204	1,300	0,048	0,034	0,113	1,495	1,395	0,373	0,082	0,126	1,976	27,8
109	239	1,350	0,056	0,026	0,110	1,542	1,150	0,326	0,101	0,115	1,692	9,3
111	251	1,500	0,046	0,027	0,081	1,655	1,298	0,354	0,078	0,120	1,850	11,2
116	264											
124	276	1,300	0,076	0,005	0,071	1,452	1,110	0,296	0,107	0,109	1,622	11,1
129	293											
134	310	1,100	0,041	0,024	0,077	1,242	1,040	0,275	0,078	0,102	1,495	18,5
153	335											
157	360	1,100	0,049	0,016	0,056	1,221	0,933	0,261	0,089	0,105	1,387	12,7
190	310	1,050	0,067	0,023	0,096	1,235	0,853	0,249	0,116	0,110	1,328	7,3
214	293											
224	286											
250	310	1,050	0,039	0,008	0,063	1,159	0,870	0,251	0,083	0,107	1,311	12,3
260	393											
305	310	0,850	0,039	0,010	0,058	0,957	0,813	0,232	0,073	0,101	1,218	24,0
321	276	0,950	0,044	0,006	0,058	1,059	0,850	0,246	0,083	0,110	1,288	19,5
329	251	1,000	0,043	0,016	0,071	1,130	0,850	0,244	0,082	0,105	1,281	12,5
335	227	0,950	0,039	0,013	0,056	1,058	0,773	0,222	0,077	0,098	1,170	10,0
340	204	0,850										
346	183	0,800	0,044	0,021	0,071	0,936	0,830	0,240	0,084	0,111	1,265	30,0
353	162	0,950										
362	144	0,950										
372	127	0,900	0,065	0,000	0,060	1,026	0,745	0,208	0,109	0,100	1,162	12,5
384	112	0,900	0,065	0,008	0,071	1,044	0,798	0,231	0,112	0,107	1,247	17,7
402	96,6	0,900										
424	81,1	0,850										
469	66,9	0,850	0,073	0,002	0,071	0,996	0,788	0,221	0,120	0,107	1,235	21,5
522	53,4	0,950	0,074	0,003	0,067	1,094	0,803	0,226	0,123	0,111	1,262	14,3
821	41,7	0,950										
1074	22,2	0,850	0,066	0,010	0,060	0,986	0,700	0,196	0,128	0,101	1,124	13,1
1257	14,9	0,800										
1462	9,50	0,800	0,078	0,003	0,054	0,936	0,580	0,164	0,128	0,096	0,968	3,4
1654	5,99	0,750										
2154	1,95	0,750	0,041	0,000	0,046	0,836	0,555	0,143	0,093	0,103	0,894	6,7
2662	0,37	0,850										
3086	0,00	0,900	0,048	0,003	0,060	1,011	0,738	0,173	0,095	0,106	1,112	9,4

ANNEXE 4-A.III,8 : Balances ioniques des écoulements de la crue du 25-27/7/88 (Concentrations en méq/l)

	T(mn)	Q(m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ ANIONS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ CATIONS	Balance(%)
16-21	0	9,50	1,050	0,058	0,029	0,075	1,212	0,920	0,254	0,101	0,104	1,379	12,94
	4 0 0	8,60	0,800	0,082	0,018	0,054	0,954	0,723	0,197	0,121	0,099	1,140	17,69
	5 8 2	5,40	0,800	0,044	0,000	0,042	0,885	0,610	0,172	0,070	0,088	0,940	5,95
	7 2 3	7,00	0,800	0,048	0,003	0,071	0,922	0,648	0,183	0,065	0,094	0,989	7,03
	7 5 7	8,60	0,800	0,061	0,006	0,063	0,930	0,643	0,181	0,062	0,088	0,973	4,58
	8 0 8	144	1,150	0,045	0,013	0,094	1,302	0,993	0,285	0,074	0,092	1,444	10,37
	8 1 2	227	1,350	0,041	0,018	0,079	1,488	1,103	0,340	0,074	0,096	1,612	8,03
	8 1 5	276	1,150	0,056	0,016	0,096	1,318	1,030	0,292	0,071	0,092	1,485	11,88
	8 2 2	310	1,250										
	8 3 7	360	1,150	0,061	0,034	0,102	1,347	1,008	0,322	0,121	0,102	1,552	14,11
	8 5 4	425	0,950	0,045	0,000	0,067	1,062	0,980	0,297	0,128	0,111	1,516	35,20
	8 8 3	360	1,000										
	9 0 7	276	0,950	0,036	0,010	0,052	1,048	0,690	0,224	0,105	0,090	1,109	5,66
	9 8 9	360	0,950	0,048	0,000	0,063	1,060	0,778	0,247	0,084	0,091	1,200	12,33
	1 1 4 4	276	0,950	0,048	0,000	0,058	1,057	0,700	0,230	0,103	0,092	1,125	6,24
	1 1 4 9	251	0,900										
	1 1 6 0	227		0,051	0,011	0,085	0,148	0,750	0,236	0,107	0,097	1,190	
	1 1 6 9	204	0,950										
	1 1 7 8	183	0,950	0,075	0,031	0,146	1,202	0,745	0,238	0,108	0,098	1,190	-1,00
	1 1 8 5	162											
	1 1 9 5	144	0,850	0,053	0,016	0,081	1,000	0,690	0,205	0,213	0,091	1,200	18,10
	1 2 0 8	127	0,900										
	1 2 1 9	112	0,900	0,049	0,006	0,085	1,041	0,735	0,227	0,125	0,104	1,191	13,38
	1 2 3 5	96,6											
	1 2 5 1	81,1		0,048	0,016	0,079		0,695	0,215	0,121	0,096	1,127	
	1 3 2 9	66,9	0,800	0,041	0,000	0,069	0,909	0,628	0,181	0,111	0,086	1,006	10,04
	1 6 7 4	41,7	0,900	0,035	0,008	0,035	0,979	0,685	0,215	0,097	0,091	1,089	10,63
23-24	0	14,9	1,200	0,032	0,000	0,033	1,266	0,883	0,237	0,036	0,073	1,228	-3,0
	2 6	9,50	1,000	0,024	0,005	0,035	1,065	0,948	0,248	0,043	0,081	1,319	21,4
	3 5	5,70	0,900	0,033	0,006	0,044	0,983	0,745	0,214	0,042	0,078	1,079	9,3
	1 3 9	1,40	0,800	0,049	0,023	0,098	0,970	0,453	0,133	0,044	0,091	0,721	-29,5
	2 2 3	66,9	1,700	0,044	0,018	0,085	1,847	1,353	0,410	0,102	0,120	1,984	7,2
	2 2 8	144	1,500	0,051	0,006	0,090	1,647	1,168	0,356	0,092	0,106	1,721	4,4
	2 3 1	204	1,600	0,040	0,000	0,058	1,699	1,320	0,414	0,099	0,115	1,948	13,7
	2 6 9	183	1,050	0,042	0,018	0,098	1,207	0,825	0,256	0,085	0,091	1,257	4,1
	2 7 9	162	0,950	0,042	0,011	0,075	1,078	0,775	0,227	0,084	0,087	1,173	8,4
	2 9 8	144	1,000	0,043	0,000	0,079	1,122	0,780	0,239	0,085	0,088	1,192	6,0
	3 4 8	162	0,950	0,050	0,008	0,094	1,101	0,738	0,225	0,095	0,089	1,146	4,0
	3 7 0	183	0,950	0,047	0,008	0,098	1,103	0,605	0,173	0,102	0,083	0,963	-13,5
	4 1 9	162	0,900										
	4 2 8	144	0,850	0,050	0,027	0,119	1,046	0,678	0,191	0,103	0,095	1,066	1,9
	4 4 1	127	0,850										
	4 4 8	112	0,800	0,052	0,029	0,115	0,996	0,673	0,192	0,101	0,094	1,059	6,2
	4 6 5	96,6	0,750										
	4 7 3	81,1	0,850	0,053	0,006	0,088	0,997	0,600	0,175	0,097	0,094	0,966	-3,1
	4 9 0	66,9	0,950										
	5 1 1	53,4	0,850	0,055	0,008	0,096	1,009	0,598	0,179	0,098	0,094	0,968	-4,1
	5 7 9	41,7	0,750	0,054	0,034	0,117	0,954	0,648	0,188	0,097	0,092	1,024	7,0
	1 0 9 6	20,7											
	1 0 9 7	22,2	0,750	0,096	0,023	0,127	0,996	0,623	0,173	0,147	0,107	1,050	5,2

ANNEXE 4-A.III,9 : Balances ioniques des écoulements de la crue des 16-21 et 23-24/8/88 (Concentrations en még/l)

Crue du 13 au 14/8/1989

T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	O-18 (‰)	Deut (‰)	d (‰)	Alc (méq/l)
0	0,30							
4	4,85	24,3	8,03	113	-5,07	-42,3	-1,74	2,65
5	6,40	24,2	7,55	114	-5,38			4,75
6	6,85	23,2	7,28	115	-5,51	-41,1	2,98	3,80
8	7,70	24,4	7,26	115	-5,29	-41,3	1,02	2,70
10	8,65	24,3	7,25	115	-5,51			2,45
13	9,10	24,1	7,20	112	-5,58	-41,1	3,54	2,50
18	10,1	24,3	7,16	110	-5,43	-40,1	3,34	2,40
21	10,6	24,3	7,15	109	-5,73	-41,6	4,24	2,05
25	11,7	24,4	6,11	108	-5,51	-43,4	0,68	1,85
41	13,4	24,5	7,24	104	-5,96			1,85
55	14,4	24,5	7,15	108	-6,64	-43,7	9,42	1,75
85	15,8	24,5	6,66	97	-6,16	-46,0	3,28	1,35
124	16,5	24,4	6,67	93	-6,19	-46,3	3,22	1,20
160	15,8							
192	13,9	24,1	4,72	88	-6,60	-49,0	3,80	1,30
238	13,9							
248	15,6	24,1	5,76	85	-6,62	-46,4	6,56	0,95
266	17,7	24,2	5,42	84	-6,43	-63,3	-11,86	0,95
282	19,2	24,2	4,92	83	-6,42			1,00
290	19,9							
313	20,6	24,5	5,01	81	-6,30	-51,2	-0,80	0,95
340	22,2	24,8	5,79	79	-6,35	-45,3	5,50	0,90
366	23,1							
406	22,2							
473	19,2	27,3	5,71	70	-5,92	-45,7	1,66	0,85
674	12,9	31,3	6,57	70	-5,04			0,80
837	10,0	30,3	7,07	73	-4,58	-38,4	-1,76	0,75
918	8,15							
1136	4,85	26,7	7,19	77	-4,74	-45,4	-7,48	0,65
1498								
1678	2,64	23,7	7,58	88	-4,23			0,70
1862	0,05							
2042	1,10	34,0	7,59	105	-3,43	-27,9	-0,46	0,85
2918	0,30							

Crue du 26 au 27/8/1989

T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	O-18 (‰)	Deut (‰)	d (‰)	Alc (méq/l)
0	0,30							
1	2,80	23,4	8,20	282	-2,21	-18,6	-0,9	1,20
2	3,64	23,3	7,75	289	-2,19			1,00
3	4,08	23,2	7,65	288	-2,19	-16,4	1,1	1,00
4	5,65	23,1	7,73	300	-2,28	-9,1	9,1	1,00
5	6,33	23,5	7,81	293	-2,12			1,05
6	7,35	23,4	7,84	290	-2,09	-36,5	-19,8	1,05
8	9,07	24,8	7,94	289	-2,19			1,05
10	10,5	23,3	8,03	291	-2,29	-2	16,3	1,20
13	12,0	23,3	7,95	288	-1,89			1,10
17	13,7	23,2	8,10	286	-2,19	-20,7	-3,2	1,10
24	16,3	23,4	7,99	277	-2,14	-34,1	-17,0	1,05
29	17,0	23,5	7,69	273	-2,32	-22,6	-4,0	1,05
31	18,4	23,6	9,32	270	-2,22			1,05
43	20,7	23,6	9,96	278	-2,27			0,90
57	21,4	23,8	9,42	353	-2,27	-21,8	-3,6	0,90
64	22,2	23,8	9,70	385	-2,32	-0,6	18,0	0,90
162	21,4	25,7	9,68	228	-2,20			0,70
406	14,9	29,8	9,92	210	-1,64	-18,6	-5,5	0,55
643	10,0	27,9	9,78	201	-1,04	-13,7	-5,4	0,45
864	6,33	25,5	9,61	201	-1,35	-5,1	5,7	0,45
1310	3,42	22,9	8,98	232	-1,56			0,50
1810	1,95	30,8	7,88	309	-1,08	-16,8	-8,2	0,65
2030	4,30	26,1	9,58	310				0,70

ANNEXE 4-A.III,10 : Données physico-chimiques des crues du Téloua en 1989.

13-14	T (mn)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K 20° (μs)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SiO ₂	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
	0	0,30												
	4	4,85	24,3	8,03	113	2,65	2,06	0,00	2,90	18,30	39,80	5,83	2,16	6,26
	5	6,40	24,2	7,55	114	4,75	2,62	2,10	2,50	38,20	75,85	9,06	2,55	7,85
	6	6,85	23,2	7,28	115	3,80	2,30	1,70	2,00	33,20	69,15	8,58	2,44	7,12
	8	7,70	24,4	7,26	115	2,70	2,16	0,00	1,90	22,10	41,10	5,93	2,27	6,31
	10	8,65	24,3	7,25	115	2,45	2,03	0,00	1,70	17,90	38,15	5,44	2,08	5,90
	13	9,10	24,1	7,20	112	2,50	2,17	0,00	2,60	21,10	38,90	5,42	2,09	5,70
	18	10,1	24,3	7,16	110	2,40	2,48	0,00	1,50	20,90	37,25	5,31	2,04	5,70
	21	10,6	24,3	7,15	109	2,05	2,08	0,00	3,10	18,60	32,20	4,66	1,98	5,23
	25	11,7	24,4	6,11	108	1,85	1,98	0,00	3,70	8,00	30,65	4,37	1,92	5,12
	41	13,4	24,5	7,24	104	1,85	2,21	0,00	3,40	18,90	29,30	4,16	1,87	5,08
	55	14,4	24,5	7,15	108	1,75	2,32	0,00	3,30	13,90	28,45	4,19	1,74	4,74
	85	15,8	24,5	6,66	97	1,35	1,93	0,00	4,50	15,80	21,30	3,13	1,64	4,49
	124	16,5	24,4	6,67	93	1,20	1,74	0,00	4,70	16,10	19,10	2,84	1,61	4,36
	160	15,8												
	192	13,9	24,1	4,72	88	1,30	3,70	0,00	8,50	19,00	20,65	3,01	1,57	4,29
	238	13,9												
	248	15,6	24,1	5,76	85	0,95	1,62	0,00	5,10	14,60	16,01	2,38	1,54	4,30
	266	17,7	24,2	5,42	84	0,95	3,33	0,00	9,90	16,50	15,80	2,43	1,64	4,57
	282	19,2	24,2	4,92	83	1,00	1,69	0,00	4,30	15,50	15,65	2,39	1,49	4,12
	290	19,9												
	313	20,6	24,5	5,01	81	0,95	1,72	0,00	3,90	16,40	15,80	2,41	1,68	4,21
	340	22,2	24,8	5,79	79	0,90	1,33	0,00	3,70	15,70	15,10	2,29	1,48	4,08
	366	23,1												
	406	22,2												
	473	19,2	27,3	5,71	70	0,85	1,10	0,00	2,50	8,90	12,45	1,99	1,35	4,06
	674	12,9	31,3	6,57	70	0,80								
	837	10,0	30,3	7,07	73	0,75	2,91	0,00	2,80	13,80	11,30	1,79	2,02	4,12
	918	8,15												
	1136	4,85	26,7	7,19	77	0,65	1,96	0,00	3,00	13,40	10,00	1,58	2,23	3,74
	1678	2,64	23,7	7,58	88	0,70	1,45	0,00	3,10	11,00	10,85	1,57	2,15	3,71
	2042	1,10	34,0	7,59	105	0,85	2,02	0,00	3,00	7,40	13,05	1,83	2,40	4,44
26-27	0	0,30												
	1	2,80	23,4	8,20	282	1,20	1,93	0,00	3,20	15,20	18,65	2,85	2,29	4,38
	2	3,64	23,3	7,75	289	1,00	1,76	0,00	3,40	14,30	15,95	2,42	2,24	4,27
	3	4,08	23,2	7,65	288	1,00	1,69	0,00	3,30	14,40	15,70	2,40	2,15	4,16
	4	5,65	23,1	7,73	300	1,00	1,87	0,00	3,70	15,30	15,85	2,40	2,16	4,20
	5	6,33	23,5	7,81	293	1,05	1,64	0,00	3,50	14,00	16,45	2,50	2,16	4,24
	6	7,35	23,4	7,84	290	1,05								
	8	9,07	24,8	7,94	289	1,05	1,86	0,00	3,50	15,60	16,50	2,46	2,11	4,16
	10	10,5	23,3	8,03	291	1,20	1,80	0,00	3,10	16,20	18,35	3,00	2,23	4,42
	13	12,0	23,3	7,95	288	1,10								
	17	13,7	23,2	8,10	286	1,10	1,69	0,00	3,20	15,90	17,85	2,82	2,21	4,11
	24	16,3	23,4	7,99	277	1,05								
	29	17,0	23,5	7,69	273	1,05	2,09	0,00	3,00	14,60	16,40	2,54	2,17	4,19
	31	18,4	23,6	9,32	270	1,05								
	43	20,7	23,6	9,96	278	0,90	1,53	0,00	2,90	16,00	14,05	2,21	1,80	3,72
	57	21,4	23,8	9,42	353	0,90	2,34	0,00	3,10	14,00	14,40	2,27	1,86	3,75
	64	22,2	23,8	9,70	385	0,90	1,03	0,00	2,20	15,70	13,80	2,24	1,98	3,86
	162	21,4	25,7	9,68	228	0,70	1,67	0,00	3,00	9,40	11,75	1,90	1,87	3,59
	406	14,9	29,8	9,92	210	0,55	1,74	0,00	2,70	13,90	9,10	1,49	1,75	3,34
	643	10,0	27,9	9,78	201	0,45	1,43	0,00	2,50	10,80	7,70	1,22	1,35	3,08
	864	6,33	25,5	9,61	201	0,45	1,19	0,00	3,30	12,90	7,75	1,24	1,20	2,80
	1310	3,42	22,9	8,98	232	0,50	1,58	0,20	3,20	5,50	9,30	1,44	1,88	3,40
	1810	1,95	30,8	7,88	309	0,65	1,49	0,00	3,10	6,60	11,10	1,65	1,79	3,74

ANNEXE 4-A.III.11 Chimie des écoulements du Téloua; crues des 13-14 et 26-27/8/89

	T(mn)	Q(m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ ANIONS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ CATIONS	Balance(%)	
26-27	4	4,85	2,65	0,058		0,060	2,769	1,990	0,486	0,094	0,161	2,730	-1,4	
	5	6,40	4,75	0,074	0,034	0,052	4,910	3,793	0,755	0,111	0,201	4,860	-1,0	
	6	6,85	3,80	0,065	0,027	0,042	3,934	3,458	0,715	0,106	0,183	4,461	12,6	
	8	7,70	2,70	0,061		0,040	2,801	2,055	0,494	0,099	0,162	2,810	0,3	
	10	8,65	2,45	0,057		0,035	2,543	1,908	0,453	0,090	0,151	2,603	2,3	
	13	9,10	2,50	0,061		0,054	2,615	1,945	0,452	0,091	0,146	2,634	0,7	
	18	10,1	2,40	0,070		0,031	2,501	1,863	0,443	0,089	0,146	2,540	1,5	
	21	10,6	2,05	0,059		0,065	2,173	1,610	0,388	0,086	0,134	2,219	2,1	
	25	11,7	1,85	0,056		0,077	1,983	1,533	0,364	0,083	0,131	2,111	6,3	
	41	13,4	1,85	0,062		0,071	1,983	1,465	0,347	0,081	0,130	2,023	2,0	
	55	14,4	1,75	0,065		0,069	1,884	1,423	0,349	0,076	0,122	1,969	4,4	
	85	15,8	1,35	0,054		0,094	1,498	1,065	0,261	0,071	0,115	1,512	0,9	
	124	16,5	1,20	0,049		0,098	1,347	0,955	0,237	0,070	0,112	1,373	1,9	
	160	15,8												
	192	13,9	1,30	0,104		0,177	1,581	1,033	0,251	0,068	0,110	1,462	-7,9	
	238	13,9												
	248	15,6	0,95	0,046		0,106	1,102	0,801	0,198	0,067	0,110	1,176	6,5	
	266	17,7	0,95	0,094		0,206	1,250	0,790	0,203	0,071	0,117	1,181	-5,7	
	282	19,2	1,00	0,048		0,090	1,137	0,783	0,199	0,065	0,106	1,152	1,3	
	49	19,9												
	313	20,6	0,95	0,049		0,081	1,080	0,790	0,201	0,073	0,108	1,172	8,2	
	340	22,2	0,90	0,038		0,077	1,015	0,755	0,191	0,064	0,105	1,115	9,4	
	366	23,1												
	406	22,2												
	473	19,2	0,85	0,031		0,052	0,933	0,623	0,166	0,059	0,104	0,951	1,9	
	674	12,9	0,80											
837	10,0	0,75	0,082		0,058	0,890	0,565	0,149	0,088	0,106	0,908	1,9		
918	8,15													
1136	4,85	0,65	0,055		0,063	0,768	0,500	0,132	0,097	0,096	0,825	7,1		
1498														
1678	2,64	0,70	0,041		0,065	0,805	0,543	0,131	0,093	0,095	0,862	6,8		
2042	1,10	0,85	0,057		0,063	0,969	0,653	0,153	0,104	0,114	1,023	5,4		
13-14	1	2,80	1,200	0,054		0,067	1,321	0,933	0,238	0,100	0,112	1,382	4,5	
	2	3,64	1,000	0,050		0,071	1,120	0,798	0,202	0,097	0,109	1,206	7,4	
	3	4,08	1,000	0,048		0,069	1,116	0,785	0,200	0,093	0,107	1,185	6,0	
	4	5,65	1,000	0,053		0,077	1,130	0,793	0,200	0,094	0,108	1,194	5,5	
	5	6,33	1,050	0,046		0,073	1,169	0,823	0,208	0,094	0,109	1,233	5,4	
	6	7,35	1,050											
	8	9,07	1,050	0,052		0,073	1,175	0,825	0,205	0,092	0,107	1,228	4,4	
	10	10,5	1,200	0,051		0,065	1,315	0,918	0,250	0,097	0,113	1,378	4,6	
	13	12,0	1,100											
	17	13,7	1,100	0,048		0,067	1,214	0,893	0,235	0,096	0,105	1,329	9,0	
	24	16,3	1,050											
	29	17,0	1,050	0,059		0,063	1,171	0,820	0,212	0,094	0,107	1,233	5,2	
	31	18,4	1,050											
	43	20,7	0,900	0,043		0,060	1,004	0,703	0,184	0,078	0,095	1,060	5,5	
	57	21,4	0,900	0,066		0,065	1,031	0,720	0,189	0,081	0,096	1,086	5,3	
	64	22,2	0,900	0,029		0,046	0,975	0,690	0,187	0,086	0,099	1,062	8,5	
	162	21,4	0,700	0,047		0,063	0,810	0,588	0,158	0,081	0,092	0,919	12,7	
	406	14,9	0,550	0,049		0,056	0,655	0,455	0,124	0,076	0,086	0,741	12,3	
	643	10,0	0,450	0,040		0,052	0,542	0,385	0,102	0,059	0,079	0,624	14,0	
	864	6,33	0,450	0,034		0,069	0,552	0,388	0,103	0,052	0,072	0,615	10,7	
1310	3,42	0,500	0,045	0,003	0,067	0,614	0,465	0,120	0,073	0,087	0,745	19,2		
1810	1,95	0,650	0,042		0,065	0,757	0,555	0,138	0,078	0,096	0,866	13,5		

ANNEXE 4-A.III,12 : Balances ioniques des écoulements de la crue des 13-14 et 26-27/8/88 (Concentrations en méq/l)

Crue du 23 au 25/7/1990

Hmn	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	T air (°C)	O-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (még/l)
23:44	58,70	24,1	6,18	99,5		-2,46	-22,4	1,00
23:45	121,00	24,1	6,12	101,5		-2,75		0,95
23:46	138,00	24,2	6,08	99,9		-2,74		1,15
23:47	156,00	24,1	6,05	98,0		-3,29	-25,8	0,95
23:48	176,00	24,1	6,04	95,0		-3,39		0,90
23:50	197,00	24,1	6,04	94,3		-3,38		0,95
23:53	208,00	24,1	6,08	93,2		-3,43	-24,9	0,95
23:55	219,00	24,1	6,08	92,0		-2,74	-22,8	0,95
0:00	219,00	24,0	6,08	90,0		-3,27		1,10
0:04	231,00	24,0	6,09	89,0		-3,35	-26,9	0,80
0:10	242,00	23,9	6,04	86,2		-2,91	-25,4	0,80
0:17	240,00	23,8	5,97	84,2		-3,52	-27,0	0,75
0:29	240,00	23,7	5,99	83,0		-3,28		0,70
0:36	219,00	23,6	6,03	81,8		-3,22	-26,2	0,65
0:46	197,00	23,5	5,97	80,9		-3,59		0,60
0:55	176,00	23,4	6,10	80,3		-4,22	-28,6	0,60
1:06	156,00	23,3	6,07	79,3		-4,04		0,55
1:22	121,00	23,2	6,04	78,9		-4,00	-28,3	0,55
1:46	90,00	23,2	6,02	78,8		-4,05		0,55
2:07	58,70	23,1	6,07	79,2		-4,26	-29,6	0,55
2:54	31,50	23,1	6,07	79,9		-3,95		0,55
5:00	41,70	22,9	5,97	79,7		-4,02	-29,4	0,55
7:30	39,10	22,8	5,94	75,5		-3,70	-30,1	0,65
10:48	31,50	24,6	5,98	73,1		-3,63		0,50
17:28	14,40	28,5	6,06	75,3		-3,64		0,45
23:05	5,50	25,4	6,18	76,6		-3,58	-27,1	0,40
8:00	1,61	24,4	6,20	84,3	29,8	-3,82		0,45
12:03	0,25	33,1	6,24	94,2	37,6	-3,18		0,60

Crue du 28 au 30/7/1990

Hmn	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	T air (°C)	O-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (még/l)
21:26	1,05	23,7	6,86	74,1	22,5	-0,61	-5,6	1,50
21:29	1,61	23,6	7,29	70,5		-0,87		1,30
21:31	1,98	23,7	7,42	73,2		-1,00	-9,0	1,15
21:32	2,53	23,6	7,24	71,2		-0,68	-8,2	1,20
21:40	2,90	23,5	7,44	64,8		-0,50	-7,2	1,05
21:53	3,16	23,5	6,78	59,3		-0,97	-7,1	0,90
21:54	5,50	23,6	6,56	59,4		-0,63	-8,4	0,85
21:55	11,9	23,8	5,75	59,6		-1,11		1,15
21:57	13,9	23,7	5,60	60,1		-1,29	-8,6	0,95
21:59	17,9	23,9	5,52	63,0		-0,99		1,00
22:01	21,3	24,1	7,15	66,7		-0,90	-9,4	1,65
22:04	26,4	24,1	7,40	67,1		-1,68	-11,3	1,20
22:05	29,5	24,1	8,79	67,2		-1,61		1,20
22:10	31,5	24,2	9,01	68,3		-1,37		1,30
22:14	32,8	24,2	9,03	69,5		-0,82	-10,2	1,20
22:18	34,0	24,2	8,68	70,2		-1,21	-10,5	1,20
22:31	31,5	24,4	8,77	73,1		-1,03		1,20
22:42	30,5	24,4	8,98	73,2		-1,02	-17,8	1,15
22:58	27,4	24,4	9,14	72,4	22,3	-1,57	-12,4	1,10
23:35	27,4	24,1	9,37	70,6		-1,58		0,95
0:25	24,4	23,9	10,12	68,5		-1,36		0,90
2:26	16,5	23,7	9,62	65,9		-1,48		0,75
3:54	10,8	23,5	9,47	66,9		-1,63		0,70
6:34	6,64	23,2	9,09	65,2	24,3	-1,58		0,70
9:22	3,68	26,2	8,52	71,2		-1,72	-11,6	0,60
9:52	9,81	27,2	8,09	70,1		-1,77		0,65
9:55	11,9	27,1	8,38	70,4		-1,82	-12,6	0,75
10:02	14,4	27,2	8,43	75,5		-1,74	-12,5	0,75
10:14	17,9	27,9	8,38	80,5		-1,83		0,75
10:36	21,3	27,0	8,29	78,5		-2,17	-13,4	0,95
15:46	14,4	30,8	8,35	78,8	31,7	-1,41	-10,9	0,90
22:49	9,81	27,4	8,68	80,1	32,6	-1,69		0,70
9:50	3,42	28,4	8,49	87,3	30,6	-1,48	-12,9	0,65

ANNEXE 4-A.III,13 : Données physico-chimiques des écoulements du Téloua en 1990; crues des 23-25 et 28-30/7/90.

Crue du 13 au 14/8/1990

Hmn	Q (m³/s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	T air (°C)	O-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (méq/l)	
21:01	0,25	25,1	7,10	89,0	26,1	0,29	-0,8	1,10	
21:02	1,05	25,0	7,01	89,0		0,41		1,20	
21:03	1,61	25,0	7,16	86,0		0,49	1,3	1,05	
21:03	1,98	25,0	6,97	84,0		-0,08	0,8	0,95	
21:04	2,35	25,0	6,82	83,0		0,58	0,3	0,90	
21:05	2,53	25,0	6,73	82,0		0,41		0,95	
21:06	2,53	25,1	7,07	81,0		-0,25	1,8	1,00	
21:07	2,90	25,1	6,93	80,0		0,82	1,1	0,90	
21:08	3,42	25,1	6,77	79,0		0,65		0,90	
21:10	3,68	25,1	7,33	79,0		0,39		0,95	
21:13	3,94	25,0	7,24	77,0		0,44		0,95	
21:14	4,20	25,0	7,22	76,0		0,18	-1,2	0,90	
21:19	4,72	25,0	7,11	74,0		-0,24	-0,4	0,85	
21:21	4,98	25,1	6,90	73,0		0,28		0,90	
21:25	5,24	25,1	6,90	71,0	0,05	2,6	0,80		
21:29	5,50	25,1	7,15	70,0	0,22		0,75		
21:35	5,50	25,2	6,40	68,0	0,22		0,70		
21:38	5,88	25,2	6,50	67,0	-0,01		0,75		
21:44	6,26	25,2	6,83	66,0	0,09		0,80		
21:52	6,26	25,2	7,13	65,0	0,22		0,80		
22:08	6,26	25,2	8,12	64,0	0,35	-1,3	0,75		
22:15	5,88	25,2	9,44	65,0	-0,37	-2,1	0,75		
22:26	5,50	25,1	9,54	65,0	25,2	-0,19		0,70	
23:02	5,24	25,0	9,81	64,0		-0,58		0,65	
23:19	6,26	25,0	9,74	62,0		-0,94	-2,5	0,65	
23:33	7,02	24,9	9,58	62,0		-0,78		0,65	
23:43	8,16	24,9	9,47	62,0		-0,61	-2,3	0,70	
23:56	9,30	24,9	9,68	65,0		-1,00		0,75	
0:09	10,30	25,0	9,46	70,0		-0,54		0,80	
0:35	11,30	25,1	9,26	73,0		-0,03	-3	0,85	
1:41	9,30	25,0	9,20	73,0		23,9	-0,57		0,85
2:26	7,40	24,8	9,17	73,0			-0,90	-2,2	0,80
3:00	5,50	24,6	9,30	73,0			-0,51	-8,4	0,70
4:36	2,90	23,9	8,82	73,0			-0,45		0,70
7:21	1,05	23,7	8,99	78,0		23,9	-0,51		0,70
12:24	0,25	36,2	9,00	96,0			37,5	-0,18	-5,8
18:45	0,15	26,9	8,43	108,0					

Crue du 14 au 15/8/1990

Hmn	Q (m³/s)	T (°C)	pH	K ₂₀ (μS)	T air (°C)	O-18 (‰)	Deut (‰)	Alc (méq/l)
18:45	0,15	26,9	8,43	108				
18:46	0,20	26,8	8,42	108		-0,86	-8,5	0,95
18:47	0,56	26,7	8,39	108		-0,45	-7	1,10
18:49	1,05	26,7	8,33	102		-0,80	-4,5	0,95
18:50	1,98	26,6	8,33	85		0,29	-1,1	1,05
18:51	2,90	26,3	8,29	70		0,19	-0,3	0,85
18:53	4,20	26,5	8,22	77		0,10	-1,4	0,85
18:54	5,50	26,5	8,09	82		0,15	2,4	0,95
18:56	7,40	26,5	8,17	82		0,22		0,95
19:00	8,92	26,5	8,10	81		0,46	0,4	0,95
19:05	11,30	26,4	8,01	77		0,29	-1	0,85
19:10	12,90	26,3	7,99	73		0,57	1,1	0,85
19:15	14,40	26,2	7,98	68		0,52		0,75
19:20	15,80	26,1	7,97	66		0,20	0,6	0,85
19:25	17,20	26,1	7,92	63		0,24		0,70
19:35	18,50	25,9	7,92	60		0,48	-0,4	0,65
19:52	18,50	25,7	7,85	56		0,13		0,60
20:04	17,90	25,5	7,80	54		0,47		0,55
20:14	16,50	25,4	7,81	54		-0,10	-1,1	0,55
20:24	14,40	25,4	7,76	54		0,16		0,50
20:58	11,90	24,9	7,72	52		0,22	-2,6	0,50
21:21	9,30	24,8	7,59	53	23,4	-0,26	-9,4	0,50
22:13	5,50	24,5	7,55	53				0,50
23:16	2,90	24,2	7,49	54				0,55
1:07	1,05	23,8	7,60	63	23,8			0,60
6:26	0,20	23,4	7,81	87				

ANNEXE 4-A.III,14 : Données physico-chimiques des écoulements du Téloua en 1990; crues des 13-14 et 14-15/8/90.

	H, mn	T (mn)	Q (m ³ /s)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
23-25	23:44	104	58,70	1,00	1,755	16,00	4,795	12,770	17,094	3,332	5,513	2,231
	23:45	105	121,00	0,95								
	23:46	106	138,00	1,15								
	23:47	107	156,00	0,95	1,766	7,075	4,219	12,290	15,912	3,076	5,396	2,139
	23:48	108	176,00	0,90								
	23:50	110	197,00	0,95								
	23:53	113	208,00	0,95	2,888	6,933	4,348	13,370	15,932	3,089	5,513	2,162
	23:55	115	219,00	0,95	1,731	26,203	3,983	12,560	15,471	3,004	5,279	2,093
	0:00	120	219,00	1,10								
	0:04	124	231,00	0,80	1,477	8,848	4,294	11,980	14,729	2,724	4,966	2,001
	0:10	130	242,00	0,80	2,777	4,849	4,322	11,430	13,968	2,687	5,005	2,024
	0:17	137	240,00	0,75	1,783	5,708	3,796	12,320	13,647	2,651	4,966	2,185
	0:29	149	240,00	0,70								
	0:36	156	219,00	0,65	2,512	8,735	4,121	12,510	11,784	2,396	4,770	2,369
	0:46	166	197,00	0,60								
	0:55	175	176,00	0,60	2,288	8,973	4,031	17,670	10,822	2,286	4,848	2,691
	1:06	186	156,00	0,55								
	1:22	202	121,00	0,55	1,757	9,551	4,469	13,460	9,800	2,043	4,848	2,737
	1:46	226	90,00	0,55								
	2:07	247	58,70	0,55	2,189	6,311	5,262	14,540	10,200	2,092	4,106	2,967
2:54	294	31,50	0,55									
5:00	420	41,70	0,55	2,337	9,372	4,918	17,380	8,958	1,982	3,988	3,082	
7:30	570	39,10	0,65	2,203	7,445	4,057	13,600	11,563	2,396	3,754	2,783	
10:48	768	31,50	0,50									
17:28	1168	14,40	0,45									
23:05	1505	5,50	0,40	1,364	10,031	4,115	13,970	7,174	1,556	3,519	2,714	
8:00	2040	1,61	0,45									
12:03	2283	0,25	0,60									
28-30	21:26	26	1,05	1,50	1,148	9,061	2,042	16,730	15,651	3,308	3,949	1,794
	21:29	29	1,61	1,30								
	21:31	31	1,98	1,15	1,331	0,000	3,137	14,490	14,168	2,675	3,832	1,679
	21:32	32	2,53	1,20	1,193	13,429	2,515	14,650	14,790	2,882	3,871	1,817
	21:40	40	2,90	1,05	0,960	5,970	2,000	14,420	12,104	2,505	3,636	1,449
	21:53	53	3,16	0,90	1,140	9,730	2,010	11,690	10,441	2,043	3,441	1,104
	21:54	54	5,50	0,85	1,200	6,950	2,300	13,440	10,361	2,116	3,597	1,127
	21:55	55	11,9	1,15								
	21:57	57	13,9	0,95	1,060	6,400	1,760	13,630	11,162	2,237	3,480	1,242
	22:01	61	21,3	1,65	0,986	10,295	2,092	15,990	18,136	3,478	3,832	1,633
	22:04	64	26,4	1,20	0,839	7,036	2,323	15,070	15,030	2,943	3,675	1,403
	22:10	70	31,5	1,30								
	22:14	74	32,8	1,20	1,275	12,097	2,401	14,280	14,228	2,833	3,715	1,633
	22:18	78	34,0	1,20	1,992	10,459	2,398	15,280	14,289	2,967	3,636	1,610
	22:42	102	30,5	1,15								
	22:58	118	27,4	1,10	1,598	0,134	3,196	13,220	13,507	2,663	3,715	2,024
	0:25	205	24,4	0,90								
	3:54	414	10,8	0,70								
	9:22	742	3,68	0,60	1,566	11,094	2,997	8,970	7,094	1,447	3,050	2,507
	9:52	772	9,81	0,65								
9:55	775	11,9	0,75	1,605	12,816	3,675	10,630	8,557	1,800	3,089	2,185	
10:02	782	14,4	0,75	1,393	10,055	2,924	11,200	9,459	1,873	3,597	2,346	
10:14	794	17,9	0,75									
10:36	816	21,3	0,95	1,418	15,740	3,320	13,750	11,403	2,310	3,988	2,484	
15:46	1126	14,4	0,90	2,977	10,844	3,483	13,630	10,842	2,079	4,301	2,944	
22:49	1549	9,81	0,70									
9:50	2210	3,42	0,65	1,191	27,489	3,003	12,400	9,339	1,751	3,949	1,909	

ANNEXE 4-A.III,9 : Chimie des écoulements; crue des 23-25 et 28-30/7/90 (Concentrations en mg/l)

Crue du 13 au 14/8/90

H, mn	Q (m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ^{-uv}	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
21:01	0,25	1,10	1,678	10,715	10,168	4,288	13,66	12,445	2,432	3,871	2,231
21:02	1,05	1,20									
21:03	1,61	1,05	1,761	19,609	19,076	4,277	12,17	11,984	2,164	3,754	2,024
21:03	1,98	0,95	1,876	23,993	23,482	3,826	12,44	12,104	2,164	3,793	2,116
21:04	2,35	0,90	2,244	21,998	20,733	4,655	12,21	11,022	2,079	3,597	2,047
21:05	2,53	0,95									
21:06	2,53	1,00	1,467	13,396	12,562	4,039	12,36	12,465	2,347	3,910	2,346
21:07	2,90	0,90	1,693	9,955	8,979	4,395	11,78	11,082	2,006	3,675	1,886
21:08	3,42	0,90									
21:10	3,68	0,95									
21:13	3,94	0,95									
21:14	4,20	0,90	1,353		19,987	3,709	12,51	11,964	2,213	3,793	1,886
21:19	4,72	0,85	1,513	12,809	12,017	3,709	11,70	11,022	2,031	3,558	2,047
21:21	4,98	0,90									
21:25	5,24	0,80	1,320	17,742	16,428	3,831	11,75	10,601	1,958	3,363	1,840
21:29	5,50	0,75									
21:35	5,50	0,70									
21:38	5,88	0,75									
21:44	6,26	0,80									
21:52	6,26	0,80									
22:08	6,26	0,75	0,879	10,945	10,040	2,962	9,94	9,058	1,654	3,050	1,449
22:15	5,88	0,75	1,476	16,053	15,274	3,352	10,14	8,798	1,544	2,972	1,380
22:26	5,50	0,70									
23:02	5,24	0,65									
23:19	6,26	0,65	1,175	18,351	17,745	3,140	9,71	8,156	1,484	2,815	1,173
23:33	7,02	0,65									
23:43	8,16	0,70	0,870	15,815	15,365	2,402	9,77	8,737	1,593	2,893	1,242
23:56	9,30	0,75									
0:09	10,30	0,80									
0:35	11,30	0,85	1,181	18,929	16,176	3,820	11,50	10,401	1,824	3,128	1,541
1:41	9,30	0,85									
2:26	7,40	0,80	1,387	16,043	14,853	2,904	11,76	9,719	1,775	3,050	1,771
3:00	5,50	0,70	0,950	23,936	23,252	3,319	12,23	10,180	1,775	3,206	2,162
4:36	2,90	0,70									
7:21	1,05	0,70									
12:24	0,25	1,00	1,265	19,536	18,763	3,588	11,09	10,040	1,642	3,441	2,185
18:45	0,15										

Crue du 14 au 15/8/90

H, mn	Q (m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ^{-uv}	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
18:45	0,15										
18:46	0,20	0,95	1,449	21,070	19,988	3,520	13,61	10,982	1,982	3,441	2,185
18:47	0,56	1,10	1,422	15,408	14,547	3,773	13,33	12,465	2,189	4,106	2,231
18:49	1,05	0,95	1,562	30,238	28,525	3,786	13,10	12,144	2,128	3,675	2,369
18:50	1,98	1,05	2,044	15,491	14,661	3,815	13,85	13,287	2,590	3,793	2,047
18:51	2,90	0,85	1,865	11,771	10,342	3,569	10,34	10,721	1,836	3,011	1,564
18:53	4,20	0,85	1,614	18,055	16,680	3,668	11,11	11,503	1,958	3,206	1,794
18:54	5,50	0,95	1,943	21,579	20,697	4,654	11,73	12,044	2,043	3,245	2,001
18:56	7,40	0,95									
19:00	8,92	0,95	3,987	70,065		4,208	11,32	10,822	1,921	3,128	1,863
19:05	11,30	0,85	4,227	72,419		4,111	11,65	10,521	1,897	3,441	1,886
19:10	12,90	0,85	1,901	12,927		4,633	11,62	11,142	1,958	3,558	1,886
19:15	14,40	0,75									
19:20	15,80	0,85	1,236	12,462		3,178	10,85	9,860	1,739	3,128	1,357
19:25	17,20	0,70									
19:35	18,50	0,65	1,285	16,009		3,253	9,94	8,537	1,556	2,854	1,219
19:52	18,50	0,60									
20:04	17,90	0,55									
20:14	16,50	0,55	1,194	16,986		3,359	8,88	6,874	1,313	2,542	0,874
20:24	14,40	0,50									
20:58	11,90	0,50	1,105	19,146		2,936	9,02	6,613	1,763	2,581	0,897
21:21	9,30	0,50	0,750	17,070		2,898	11,83	8,637	1,824	2,737	1,035
22:13	5,50	0,50									
23:16	2,90	0,55									
1:07	1,05	0,60									
6:26	0,20	0,70	1,226	13,128		3,642	19,54	19,238	3,247	6,217	6,049

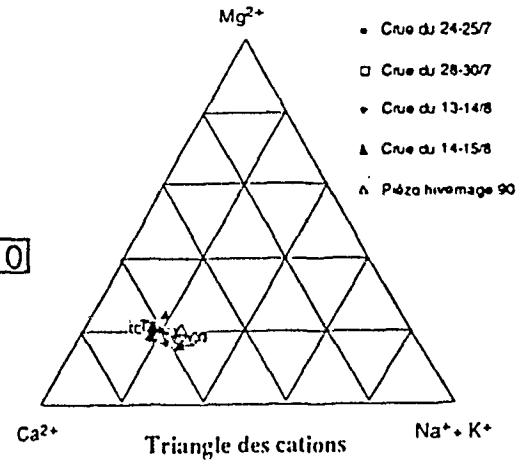
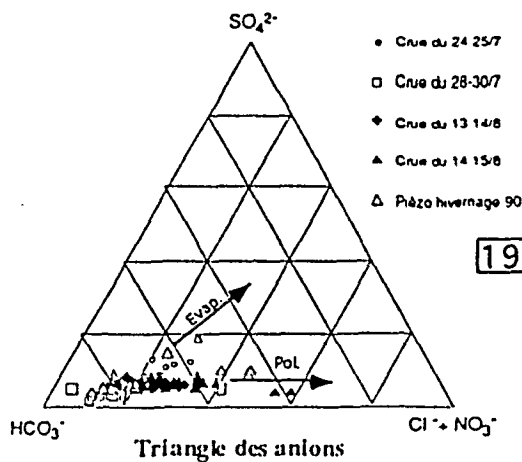
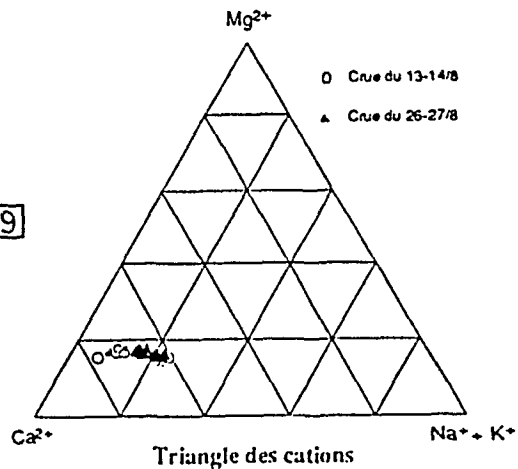
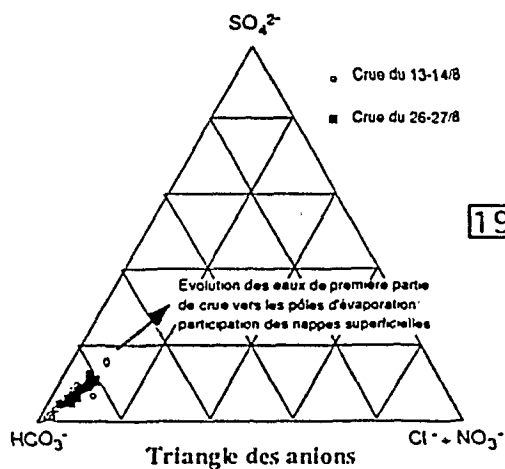
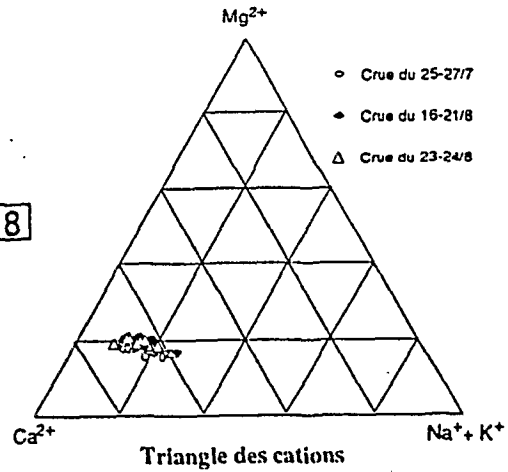
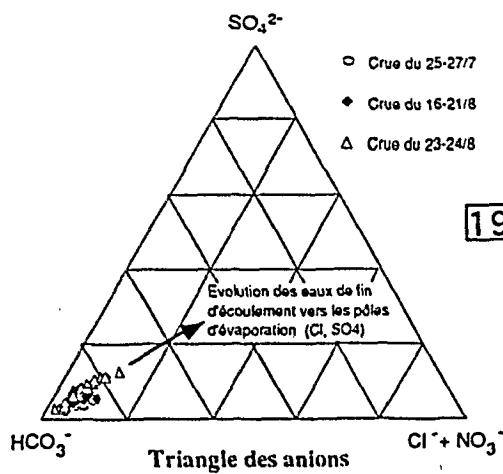
ANNEXE 4-A.III,16 Chimie des écoulements du Téloua en 1990;
crues des 13-14 et 14-15/8/90 (Alc en méq/l; ions en mg/l)

	T (mn)	Q (m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ An-NO ₃	Σ ANIONS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ CATIONS	Balance(%)	Bal-NO ₃
28-30	0	0	0,80	0,076	0,210	0,098	1,184	0,975	0,654	0,207	0,132	0,183	1,176	-1	18,8
	26	1,05	1,50	0,032	0,146	0,043	1,721	1,575	0,783	0,276	0,101	0,078	1,237	-33	-24,0
	29	1,61	1,30												
	31	1,98	1,15	0,076		0,065	1,292	1,292	0,708	0,223	0,098	0,073	1,103	-16	-15,8
	32	2,53	1,20	0,034	0,217	0,052	1,503	1,286	0,740	0,240	0,099	0,079	1,158	-26	-10,5
	40	2,90	1,05	0,027	0,096	0,042	1,215	1,119	0,605	0,209	0,093	0,063	0,970	-22	-14,2
	53	3,16	0,90	0,032	0,157	0,042	1,131	0,974	0,522	0,170	0,088	0,048	0,829	-31	-16,1
	54	5,50	0,85	0,034	0,112	0,048	1,044	0,932	0,518	0,176	0,092	0,049	0,836	-22	-10,9
	55	11,9	1,15												
	57	13,9	0,95	0,030	0,103	0,037	1,120	1,017	0,558	0,186	0,089	0,054	0,888	-23	-13,5
	59	17,9	1,00												
	61	21,3	1,65	0,028	0,166	0,044	1,887	1,721	0,907	0,290	0,098	0,071	1,366	-32	-23,0
	64	26,4	1,20	0,024	0,113	0,048	1,386	1,272	0,752	0,245	0,094	0,061	1,152	-18	-9,9
	65	29,5	1,20												
	70	31,5	1,30												
	74	32,8	1,20	0,036	0,195	0,050	1,481	1,286	0,711	0,236	0,095	0,071	1,114	-28	-14,4
	78	34,0	1,20	0,056	0,169	0,050	1,475	1,306	0,714	0,247	0,093	0,070	1,125	-27	-14,9
	91	31,5	1,20												
	102	30,5	1,15												
	118	27,4	1,10	0,045	0,002	0,067	1,214	1,212	0,675	0,222	0,095	0,088	1,081	-12	-11,4
	742	3,68	0,60	0,044	0,179	0,062	0,886	0,707	0,355	0,121	0,078	0,109	0,662	-29	-6,4
	772	9,81	0,65												
775	11,9	0,75	0,045	0,207	0,077	1,079	0,872	0,428	0,150	0,079	0,095	0,752	-36	-14,8	
782	14,4	0,75	0,039	0,162	0,061	1,012	0,850	0,473	0,156	0,092	0,102	0,823	-21	-3,2	
794	17,9	0,75													
816	21,3	0,95	0,040	0,254	0,069	1,313	1,059	0,570	0,193	0,102	0,108	0,973	-30	-8,5	
1126	14,4	0,90	0,084	0,172	0,073	1,228	1,057	0,542	0,173	0,110	0,128	0,954	-25	-10,2	
1549	9,81	0,70													
2210	3,42	0,65	0,034	0,443	0,063	1,190	0,746	0,467	0,146	0,101	0,083	0,797	-40	6,6	
24-25	104	58,7	1,00	0,050	0,258	0,100	1,407	1,149	0,855	0,278	0,141	0,097	1,371	-3	18
	105	121	0,95												
	106	138	1,15												
	107	156	0,95	0,050	0,114	0,088	1,202	1,088	0,796	0,256	0,138	0,093	1,283	7	16
	108	176	0,90												
	110	197	0,95												
	113	208	0,95	0,081	0,112	0,091	1,234	1,122	0,797	0,257	0,141	0,094	1,289	4	14
	115	219	0,95	0,049	0,423	0,083	1,504	1,082	0,774	0,250	0,135	0,091	1,250	-18	14
	120	219	1,10												
	124	231	0,80	0,042	0,143	0,089	1,074	0,931	0,736	0,227	0,127	0,087	1,178	9	23
	130	242	0,80	0,078	0,078	0,090	1,047	0,968	0,698	0,224	0,128	0,088	1,139	8	16
	137	240	0,75	0,050	0,092	0,079	0,971	0,879	0,682	0,221	0,127	0,095	1,126	15	25
	149	240	0,70												
	156	219	0,65	0,071	0,141	0,086	0,948	0,807	0,589	0,200	0,122	0,103	1,014	7	23
	166	197	0,60												
	175	176	0,60	0,065	0,145	0,084	0,893	0,749	0,541	0,191	0,124	0,117	0,973	9	26
	186	156	0,55												
	202	121	0,55	0,050	0,154	0,093	0,847	0,693	0,490	0,170	0,124	0,119	0,904	6	26
	226	90	0,55												
	247	58,7	0,55	0,062	0,102	0,110	0,823	0,721	0,510	0,174	0,105	0,129	0,919	11	24
	294	31,5	0,55												
	420	41,7	0,55	0,066	0,151	0,102	0,870	0,718	0,448	0,165	0,102	0,134	0,849	-2	17
570	39,1	0,65	0,062	0,120	0,085	0,917	0,797	0,578	0,200	0,096	0,121	0,995	8	22	
768	31,5	0,50													
1168	14,4	0,45													
1505	5,5	0,40	0,038	0,162	0,086	0,686	0,524	0,359	0,130	0,090	0,118	0,697	2	28	
2040	1,61	0,45													
2283	0,25	0,60													

ANNEXE 4-A.III,17 Balances ioniques des écoulements du Téloua; crues des 24-25 et 28-30/7/90

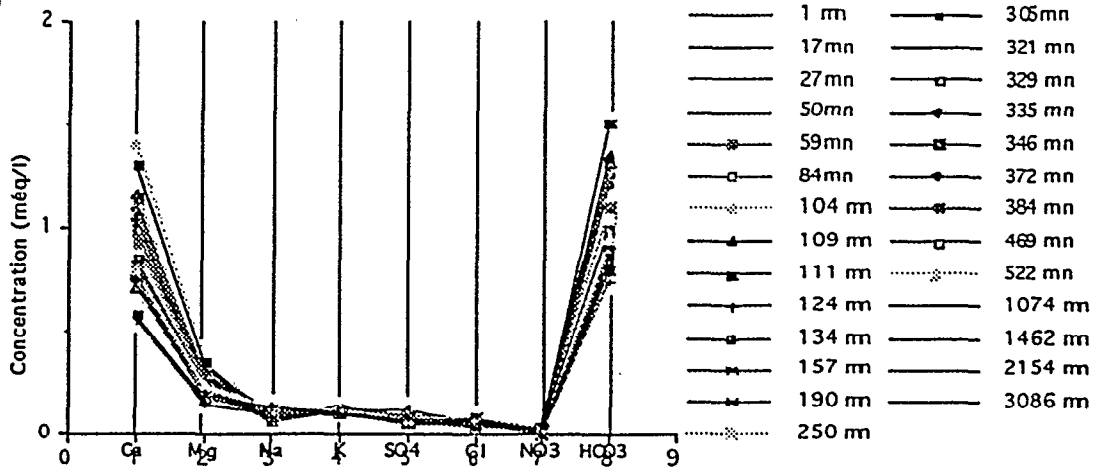
	T(mn)	Q(m ³ /s)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ ANIONS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ CATIONS	Balance(%)	Bal-NO ₃
13-14	21:01	0,25	1,10	0,047	0,164	0,089	1,400	0,622	0,203	0,099	0,095	1,019	-31,5	-19,2
	21:02	1,05	1,20											
	21:03	1,61	1,05	0,050	0,308	0,089	1,447	0,599	0,180	0,096	0,086	0,961	-40,4	-21,2
	21:03	1,98	0,95	0,053	0,379	0,080	1,462	0,605	0,180	0,097	0,090	0,972	-40,3	-10,8
	21:04	2,35	0,90	0,063	0,334	0,097	1,394	0,551	0,173	0,092	0,087	0,903	-42,8	-16,0
	21:05	2,53	0,95											
	21:06	2,53	1,00	0,041	0,203	0,084	1,328	0,623	0,196	0,100	0,100	1,019	-26,3	-9,9
	21:07	2,90	0,90	0,048	0,145	0,092	1,185	0,554	0,167	0,094	0,080	0,895	-27,9	-15,0
	21:14	4,20	0,90	0,038	0,322	0,077	1,337	0,598	0,184	0,097	0,080	0,959	-32,9	-5,7
	21:19	4,72	0,85	0,043	0,194	0,077	1,164	0,551	0,169	0,091	0,087	0,898	-25,8	-7,7
	21:21	4,98	0,90											
	21:25	5,24	0,80	0,037	0,265	0,080	1,182	0,530	0,163	0,086	0,078	0,857	-31,9	-6,8
	22:08	6,26	0,75	0,025	0,162	0,062	0,999	0,453	0,138	0,078	0,062	0,731	-31,0	-13,5
	22:15	5,88	0,75	0,042	0,246	0,070	1,108	0,440	0,129	0,076	0,059	0,704	-44,6	-20,2
	22:26	5,50	0,70											
	23:02	5,24	0,65											
	23:19	6,26	0,65	0,033	0,286	0,065	1,034	0,408	0,124	0,072	0,050	0,654	-45,0	-13,4
	23:33	7,02	0,65											
	23:43	8,16	0,70	0,025	0,248	0,050	1,023	0,437	0,133	0,074	0,053	0,697	-37,9	-10,6
	23:56	9,30	0,75											
	0:09	10,30	0,80											
	0:35	11,30	0,85	0,033	0,261	0,080	1,224	0,520	0,152	0,080	0,066	0,818	-39,8	-16,3
	1:41	9,30	0,85											
	2:26	7,40	0,80	0,039	0,240	0,061	1,140	0,486	0,148	0,078	0,075	0,787	-36,6	-13,4
3:00	5,50	0,70	0,027	0,375	0,069	1,171	0,509	0,148	0,082	0,092	0,831	-34,0	4,3	
4:36	2,90	0,70												
7:21	1,05	0,70												
12:24	0,25	1,00	0,036	0,303	0,075	1,414	0,502	0,137	0,088	0,093	0,820	-53,2	-30,1	
14-15	18:46	0,2	0,95	0,041	0,340	0,073	1,404	0,549	0,165	0,088	0,095	0,897	-44	-17
	18:47	0,56	1,1	0,040	0,249	0,079	1,467	0,623	0,182	0,105	0,097	1,008	-37	-19
	18:49	1,05	0,95	0,044	0,488	0,079	1,561	0,607	0,177	0,094	0,103	0,982	-46	-9
	18:50	1,98	1,05	0,058	0,250	0,079	1,437	0,664	0,216	0,097	0,089	1,066	-30	-11
	18:51	2,9	0,85	0,053	0,190	0,074	1,167	0,536	0,153	0,077	0,068	0,834	-33	-16
	18:53	4,2	0,85	0,046	0,291	0,076	1,263	0,575	0,163	0,082	0,078	0,899	-34	-8
	18:54	5,5	0,95	0,055	0,348	0,097	1,450	0,602	0,170	0,083	0,087	0,943	-42	-16
	18:56	7,4	0,95											
	19:00	8,92	0,95	0,112	1,130	0,088	2,280	0,541	0,160	0,080	0,081	0,862	-90	-29
	19:05	11,3	0,85	0,119	1,168	0,086	2,223	0,526	0,158	0,088	0,082	0,854	-89	-21
	19:10	12,9	0,85	0,054	0,209	0,097	1,209	0,557	0,163	0,091	0,082	0,893	-30	-11
	19:15	14,4	0,75											
	19:20	15,8	0,85	0,035	0,201	0,066	1,152	0,493	0,145	0,080	0,059	0,777	-39	-20
	19:25	17,2	0,7											
	19:35	18,5	0,65	0,036	0,258	0,068	1,012	0,427	0,130	0,073	0,053	0,683	-39	-10
	19:52	18,5	0,6											
	20:04	17,9	0,55											
	20:14	16,5	0,55	0,034	0,274	0,070	0,928	0,344	0,109	0,065	0,038	0,556	-50	-16
	20:24	14,4	0,5											
	20:58	11,9	0,5	0,031	0,309	0,061	0,901	0,331	0,147	0,066	0,039	0,583	-43	-2
	21:21	9,3	0,5	0,021	0,275	0,060	0,857	0,432	0,152	0,070	0,045	0,699	-20	18
	22:13	5,5	0,5											
	23:16	2,9	0,55											
	01:07	1,05	0,6											
06:26	0,201	0,7	0,035	0,212	0,076	1,022	0,962	0,271	0,159	0,263	1,655	47	69	

ANNEXE 4-A.III,17 Balances ioniques des écoulements du Téloua; crues des 13-14 et 14-15/8/90

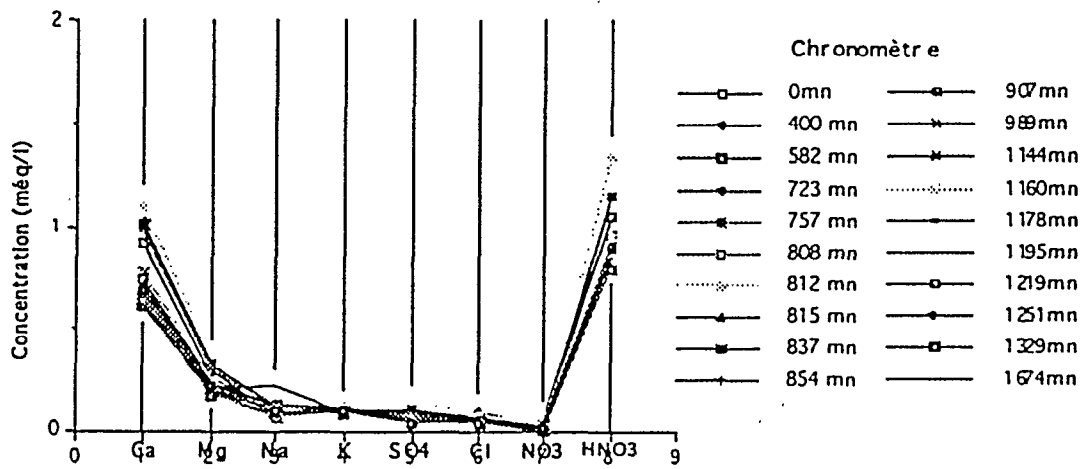


ANNEXE 4-A.III,19 : Composition chimique des eaux de crues et de nappes du Téloua à AZEL entre 1988 et 1990

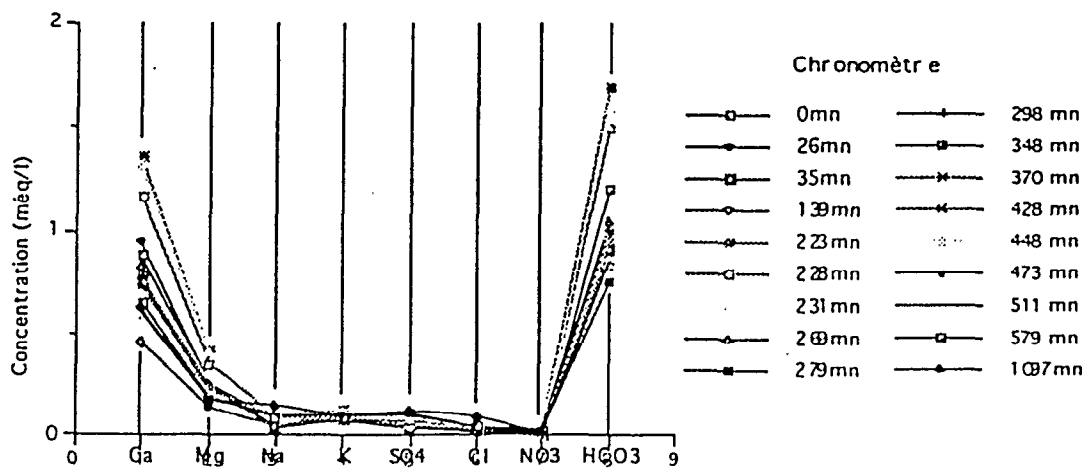
Crue du 25-27/7/88



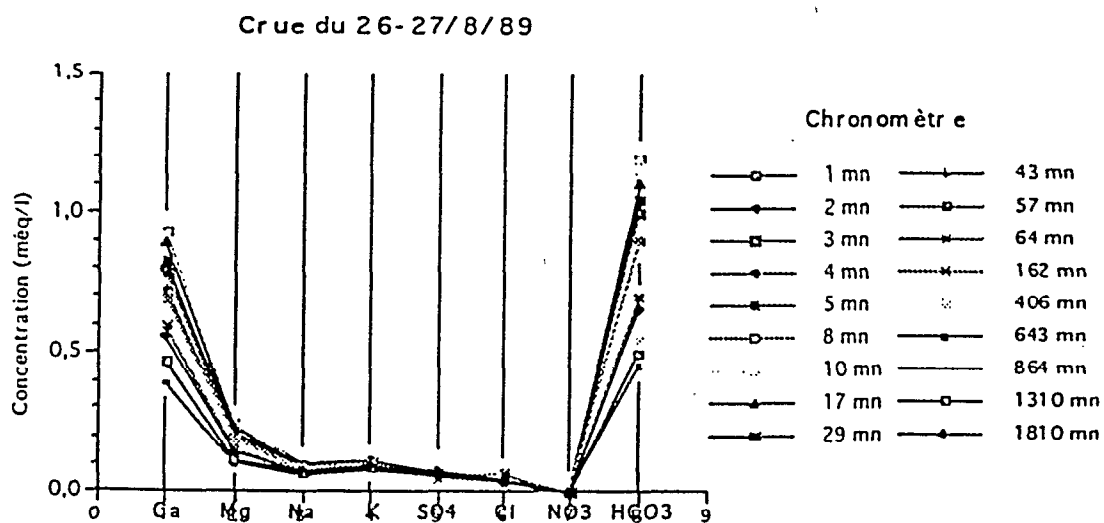
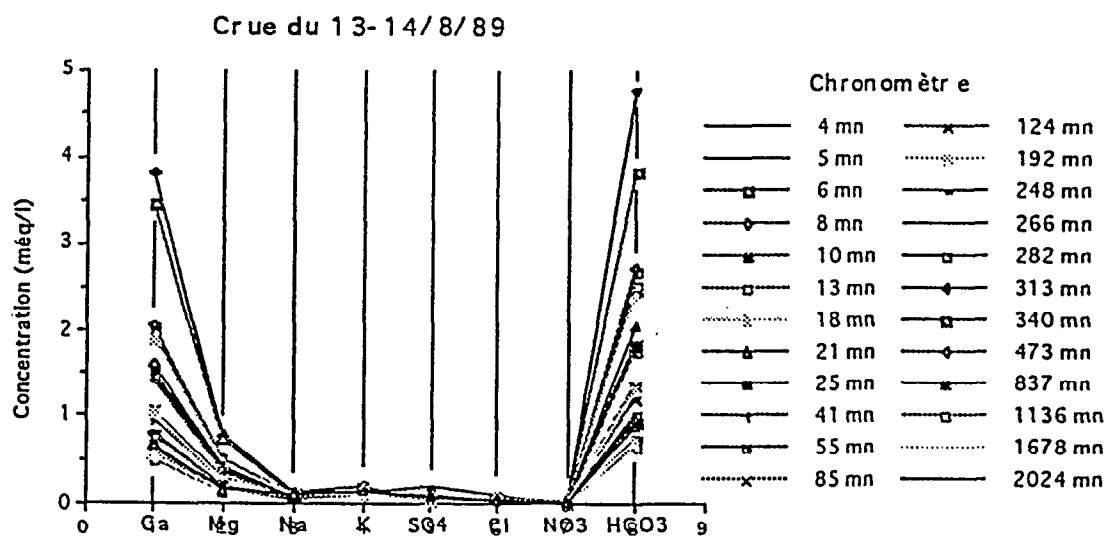
Crue du 16-21/8/88



Crue du 23-24/8/88

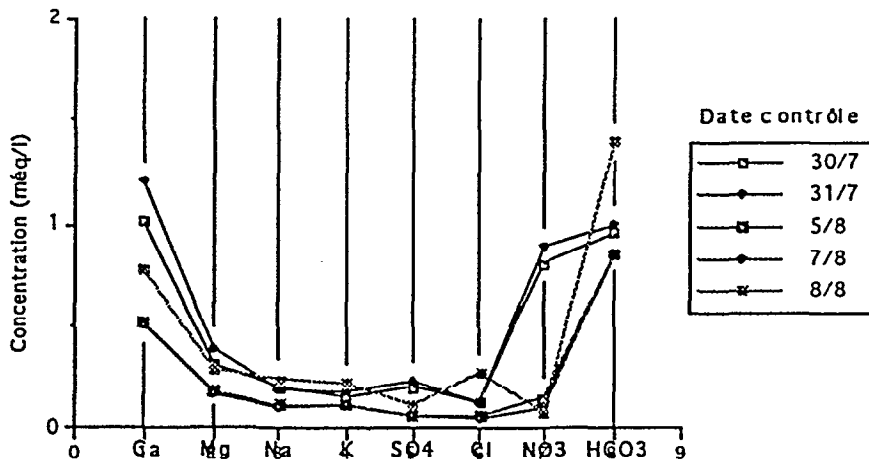


ANNEXE 4-A.III,20 : Diagrammes de Scheller des crues du Téloua en 1988

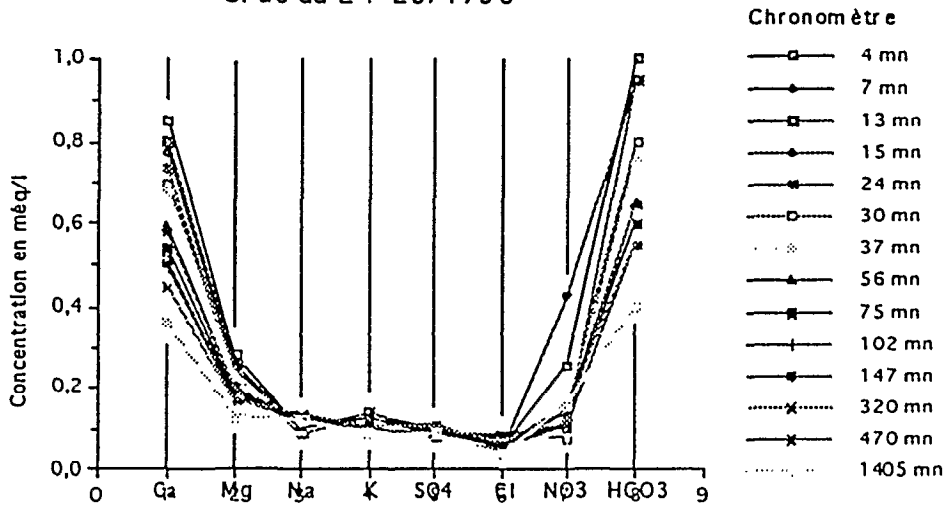


ANNEXE 4-A.III,21 : Diagramme de Schöeller des crues du Téloua en 1989

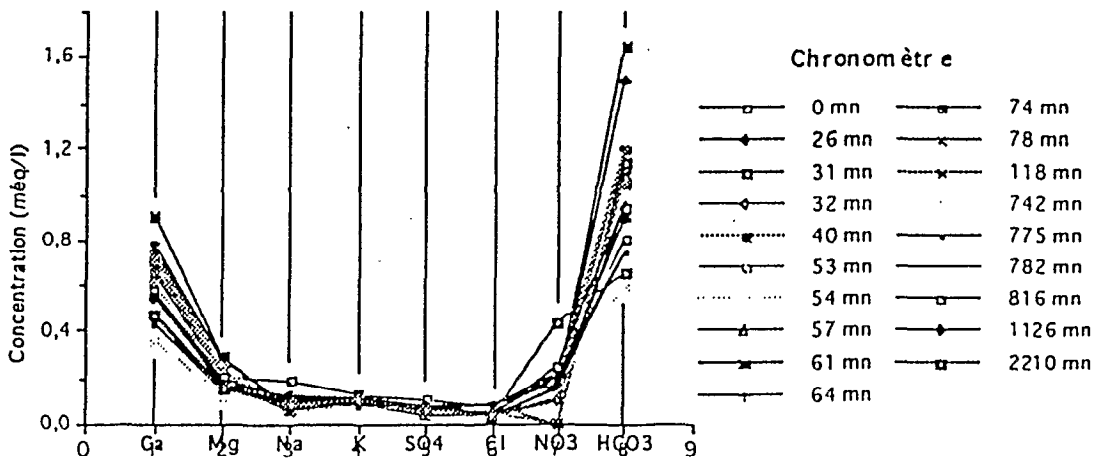
Nappe alluviale inter-crue du 30/7 au 8/8/90



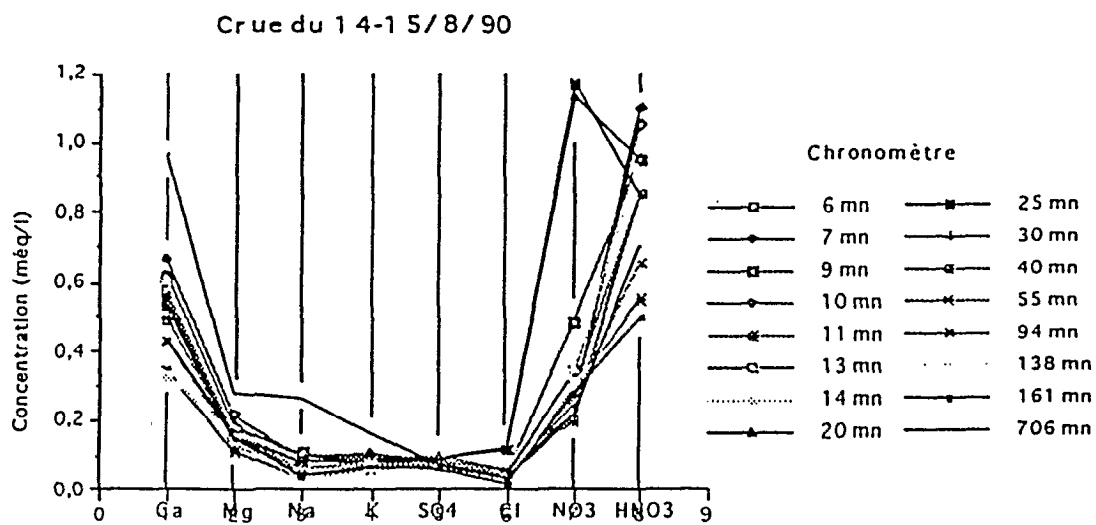
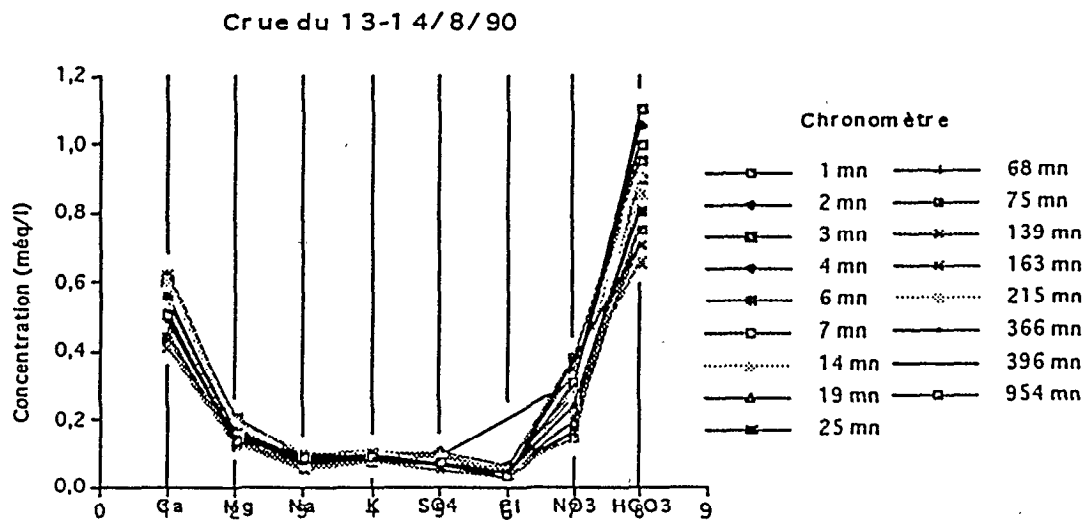
Crue du 24-25/7/90



Crue du 28-30/7/90



ANNEXE 4-A.III,22 : Diagramme de Schöeller des crues et nappes du Téloua en 1990



ANNEXE 4-A.III,23 : Diagramme de Schöeller des crues du Téloua en 1990

MATRICE DE CORRELATION CRUE DU 24-25/7/90

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,533	1,000							
Cl	0,241	0,122	1,000						
NO3	0,001	0,343	-0,367	1,000					
SO4	-0,506	-0,185	0,210	-0,111	1,000				
Ca	0,580	0,987	0,102	0,267	-0,202	1,000			
Mg	0,526	0,991	0,140	0,291	-0,174	0,993	1,000		
K	0,684	0,884	0,117	0,253	-0,158	0,887	0,877	1,000	
Na	-0,803	-0,795	0,021	-0,183	0,532	-0,833	-0,783	-0,803	1,000

POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

	AXE 1	AXE 2	AXE 3
	58,0	16,2	14,1

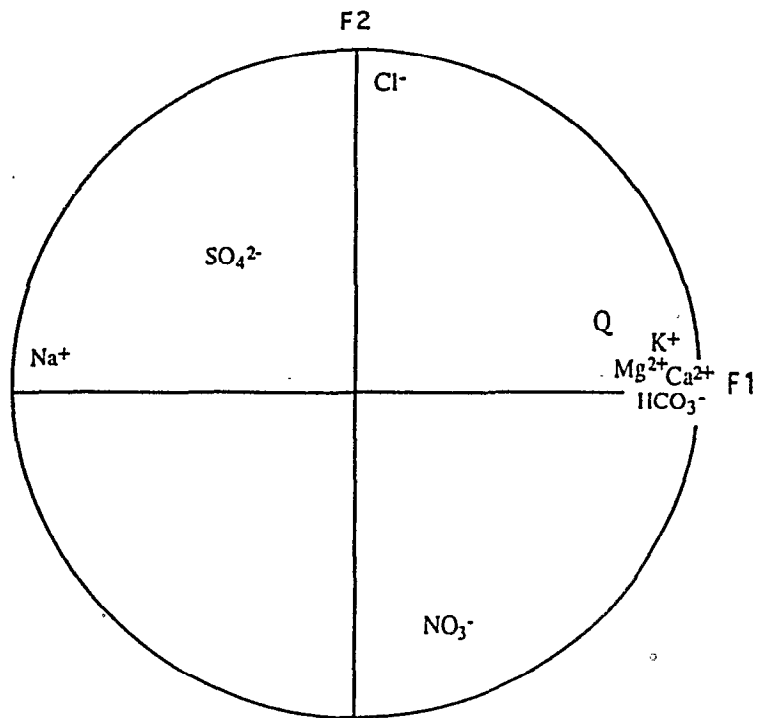
MATRICE DE CORRELATION CRUE DU 28-30/7/90

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,295	1,000							
Cl	0,028	-0,156	1,000						
NO3	-0,097	-0,330	-0,198	1,000					
SO4	0,054	-0,475	0,627	0,189	1,000				
Ca	0,356	0,973	-0,126	-0,306	-0,431	1,000			
Mg	0,362	0,983	-0,165	-0,317	-0,465	0,987	1,000		
K	0,086	0,408	0,298	0,142	0,066	0,481	0,433	1,000	
Na	0,053	-0,330	0,541	0,269	0,803	-0,347	-0,357	0,208	1,000

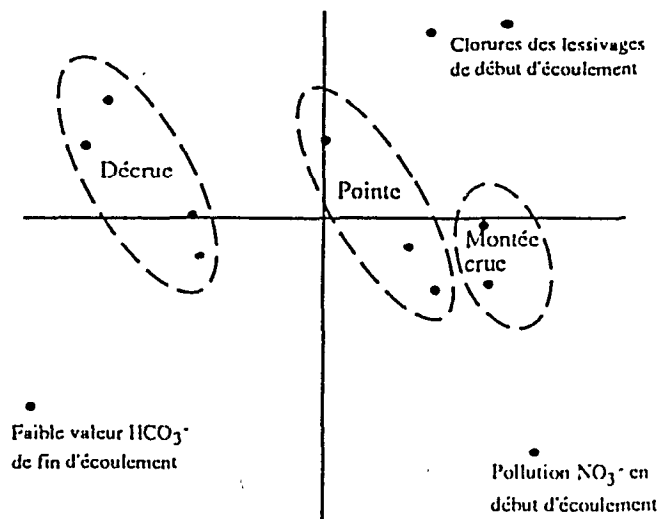
POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

	AXE 1	AXE 2	AXE 3
	43,9	24	12,7

ANNEXE 4-A.III,24 : Matrice des crues des 24-25 et 28-30/7/90

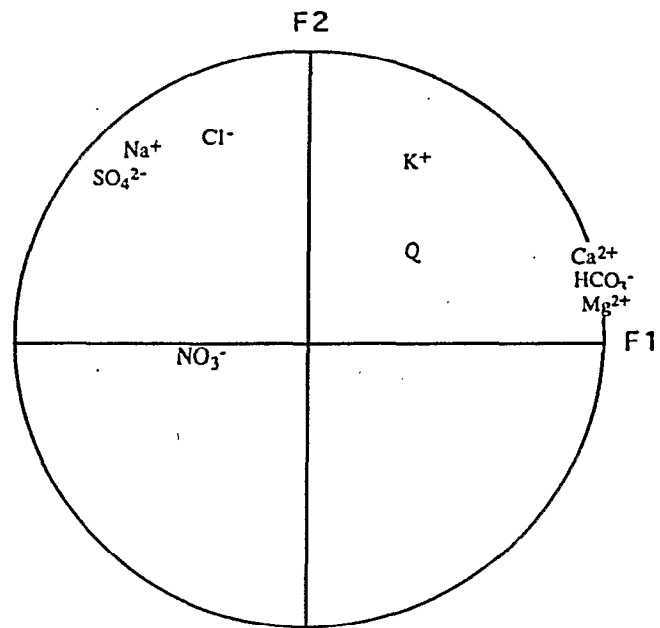


Espace des variables

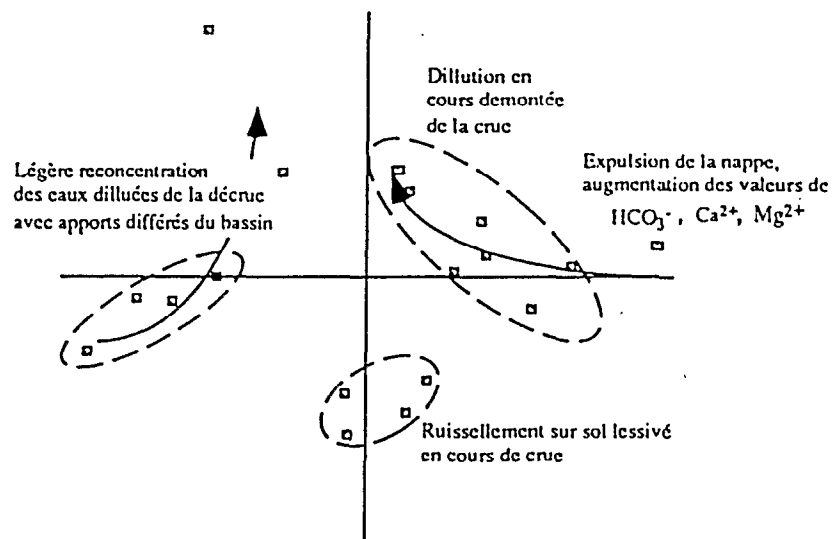


Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,25 : ACP de la crue du 24 au 25 juillet 1990



Espace des variables



Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,26 : ACP de la crue du 28 au 30 juillet 1990

MATRICE DE CORRELATION CRUE DU 28-30/7/90

	Q	pH	K	20 O-18	2-H	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000												
pH	0,853	1,000											
K 20	0,561	0,857	1,000										
O-18	0,743	0,558	0,051	1,000									
2-H	0,663	0,438	-0,088	0,990	1,000								
HCO3	0,530	0,844	0,999	0,028	-0,111	1,000							
Cl	0,643	0,892	0,994	0,127	-0,010	0,988	1,000						
NO3	0,936	0,807	0,396	0,922	0,865	0,369	0,476	1,000					
SO4	0,741	0,972	0,953	0,350	0,216	0,946	0,968	0,645	1,000				
Ca	0,906	0,942	0,634	0,804	0,714	0,615	0,690	0,949	0,837	1,000			
Mg	0,891	0,913	0,575	0,845	0,764	0,556	0,632	0,961	0,794	0,997	1,000		
K	0,882	0,831	0,426	0,924	0,864	0,405	0,493	0,985	0,678	0,970	0,985	1,000	
Na	0,844	0,999	0,853	0,563	0,444	0,839	0,888	0,807	0,968	0,944	0,917	0,835	1,000

POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
74,9	23,7	1,4

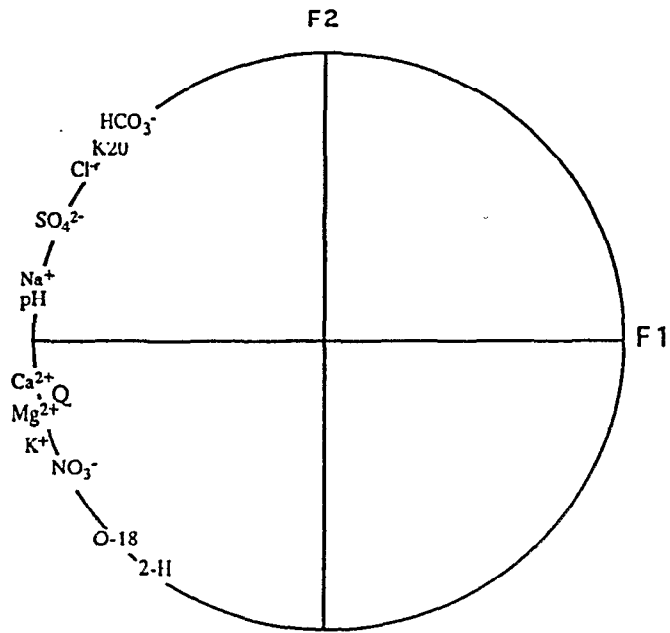
MATRICE DE CORRELATION CRUE DU 14-15/8/90

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	-0,574	1,000							
Cl	0,016	0,412	1,000						
NO3	0,085	0,193	0,903	1,000					
SO4	-0,210	0,622	0,603	0,366	1,000				
Ca	-0,690	0,471	0,086	-0,060	0,399	1,000			
Mg	-0,697	0,345	0,011	-0,094	0,245	0,940	1,000		
K	-0,574	0,295	-0,008	-0,091	0,257	0,946	0,924	1,000	
Na	-0,568	0,208	0,009	-0,044	0,248	0,935	0,900	0,974	1,000

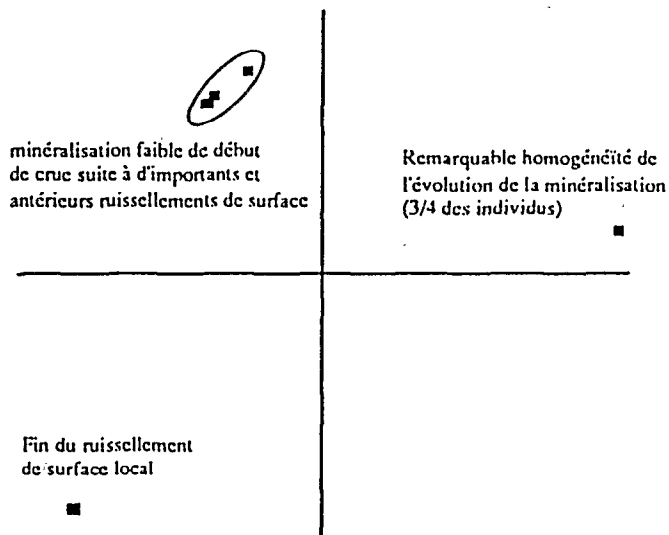
POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
51,8	27,2	10,7

ANNEXE 4-A.III,27 : Matrice des crues des 13-14 et 14-15/8/90

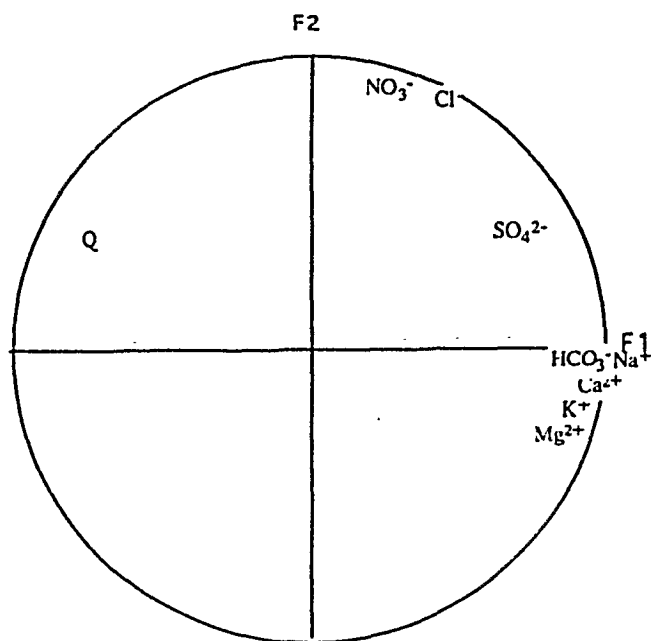


Espace des variables

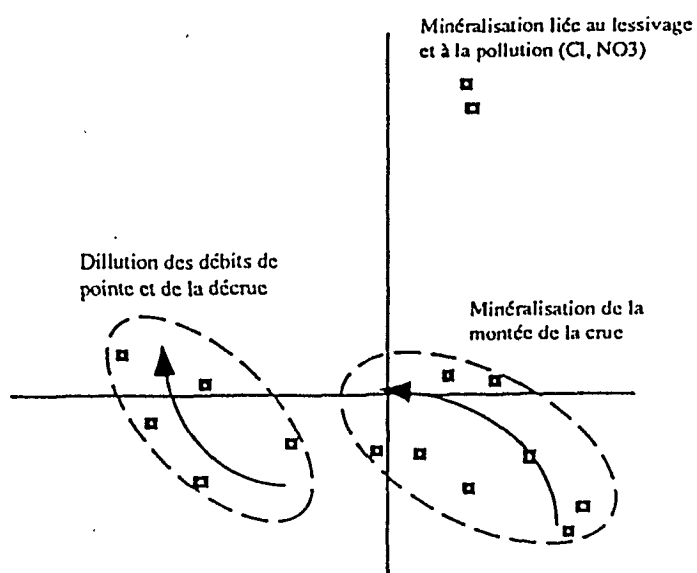


Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,28 : ACP de la crue du 13 au 14 août 1990



Espace des variables



Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,29 : ACP de la crue du 14 au 15 août 1990

CRUE DU 13-14/8/89

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	-0,385	1,000							
Cl	-0,156	0,244	1,000						
NO3	-0,272	0,763	0,188	1,000					
SO4	0,442	-0,407	0,489	-0,214	1,000				
Ca	-0,366	0,994	0,243	0,802	-0,388	1,000			
Mg	-0,355	0,993	0,243	0,727	-0,400	0,993	1,000		
K	-0,413	0,984	0,257	0,717	-0,400	0,975	0,981	1,000	
Na	-0,900	0,628	0,198	0,533	-0,536	0,620	0,599	0,656	1,000

POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
62,1	17,6	13,0

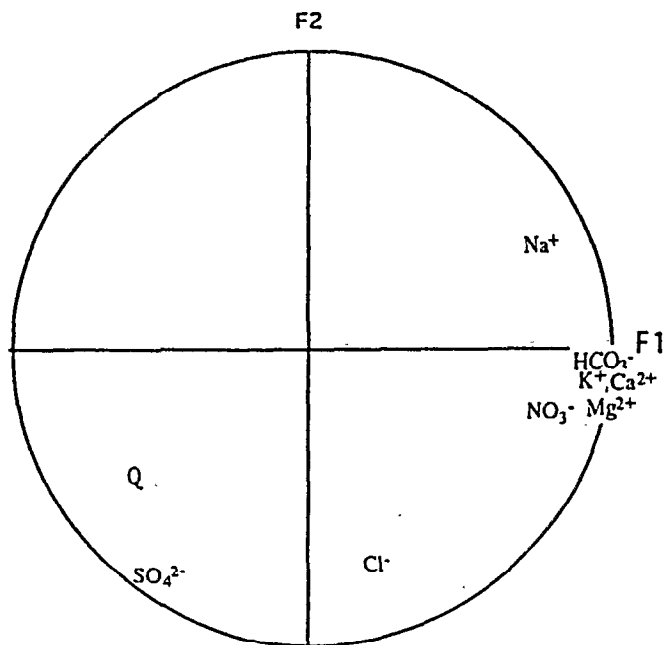
CRUE DU 26-27/8/89

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,006	1,000							
Cl	0,042	0,480	1,000						
NO3	-0,257	-0,364	-0,075	1,000					
SO4	-0,588	0,365	0,450	0,069	1,000				
Ca	-0,024	0,996	0,502	-0,320	0,409	1,000			
Mg	0,050	0,993	0,482	-0,329	0,337	0,993	1,000		
K	-0,150	0,947	0,487	-0,249	0,417	0,953	0,933	1,000	
Na	-0,081	0,923	0,505	-0,212	0,375	0,935	0,921	0,979	1,000

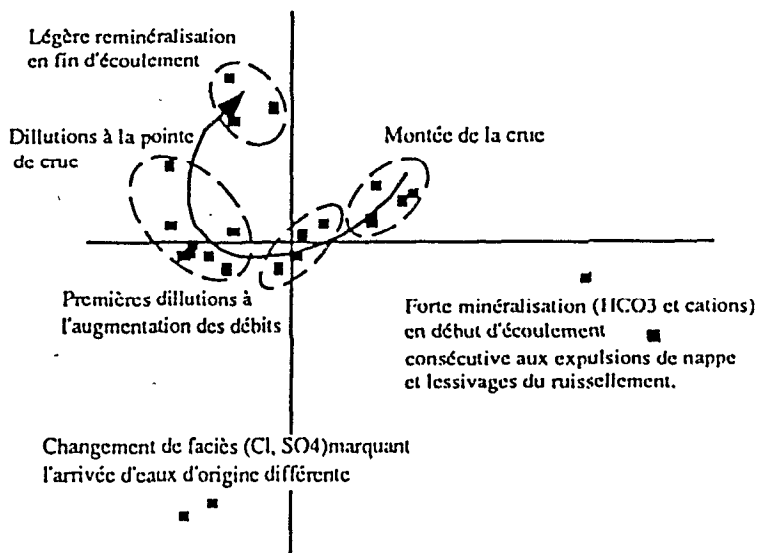
POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
60,2	18,5	9,0

ANNEXE 4-A.III,30 : Matrice des crues des 13-14 et 26-27/8/89

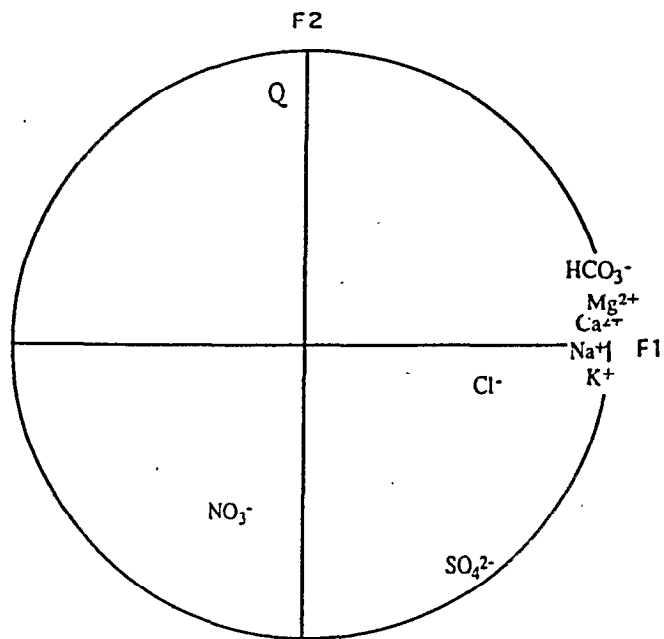


Espace des variables

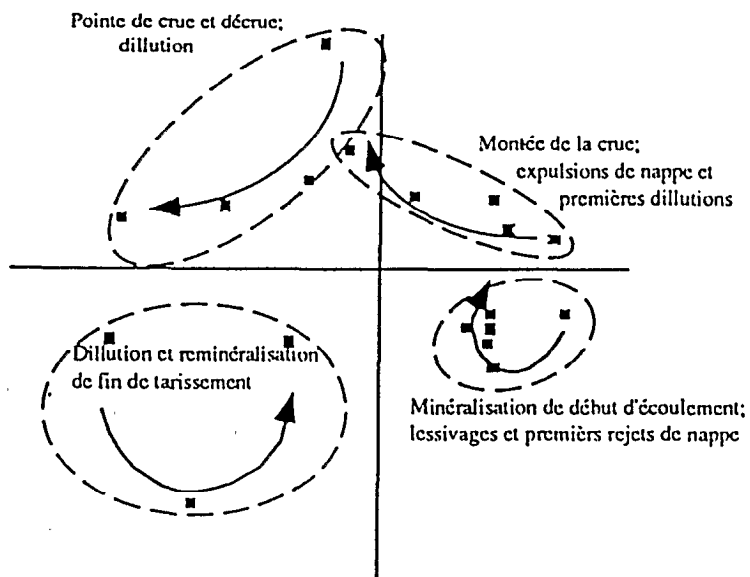


Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,31 : ACP de la crue du 13 au 14 août 1989



Espace des variables



Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,32 : ACP de la crue du 26 au 27 août 1989

CRUE DU 25-27/7/88

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,141	1,000							
Cl	-0,217	-0,141	1,000						
NO3	0,277	0,602	-0,265	1,000					
SO4	0,442	0,370	0,119	0,554	1,000				
Ca	0,234	0,916	-0,151	0,672	0,534	1,000			
Mg	0,362	0,891	-0,156	0,737	0,601	0,971	1,000		
K	0,061	0,618	0,079	0,596	0,547	0,717	0,730	1,000	
Na	-0,122	-0,419	0,875	-0,347	0,174	-0,421	-0,386	-0,070	1,000

POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
52,0	21,6	12,6

CRUE DU 16-18/8/88

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,500	1,000							
Cl	-0,142	-0,115	1,000						
NO3	0,022	0,479	0,567	1,000					
SO4	0,258	0,396	0,469	0,640	1,000				
Ca	0,535	0,909	0,034	0,453	0,394	1,000			
Mg	0,691	0,930	-0,044	0,440	0,420	0,958	1,000		
K	0,309	0,254	0,298	0,366	0,309	0,487	0,493	1,000	
Na	0,142	-0,212	0,145	0,212	0,130	-0,131	-0,066	0,270	1,000

POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
45,6	21,8	12,9

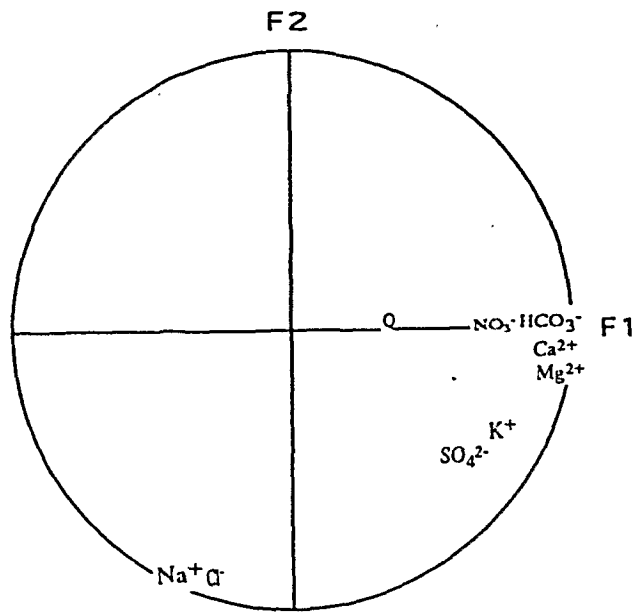
CRUE DU 23-24/8/88

	Q	HCO3	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO3	0,298	1,000							
Cl	-0,066	-0,336	1,000						
NO3	-0,169	-0,419	0,467	1,000					
SO4	0,208	-0,398	0,772	0,755	1,000				
Ca	0,263	0,952	-0,351	-0,361	-0,432	1,000			
Mg	0,346	0,959	-0,307	-0,349	-0,359	0,988	1,000		
K	0,241	0,553	0,441	0,220	0,389	0,547	0,608	1,000	
Na	0,412	-0,025	0,789	0,356	0,753	-0,003	0,060	0,649	1,000

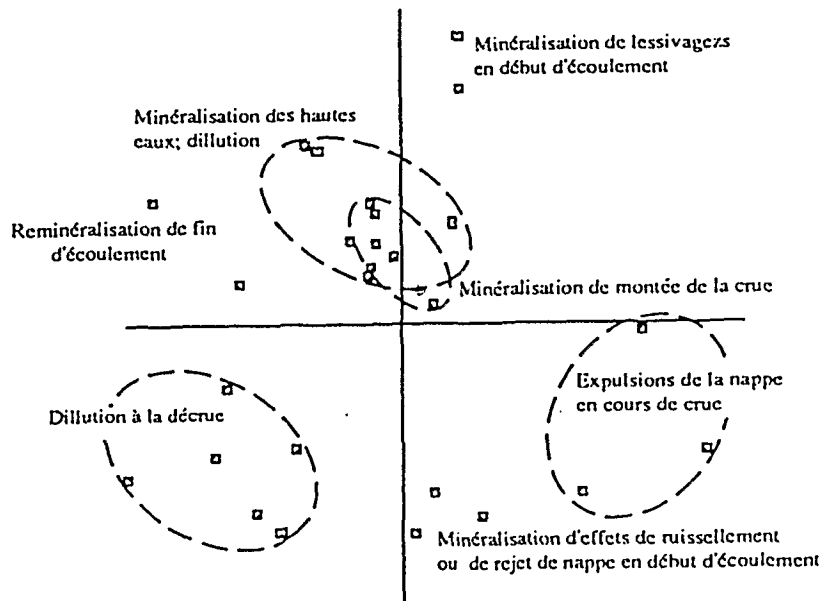
POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
44,4	35,0	10,9

ANNEXE 4-A.III,33 : Matrices des crues du Téloua en 1988

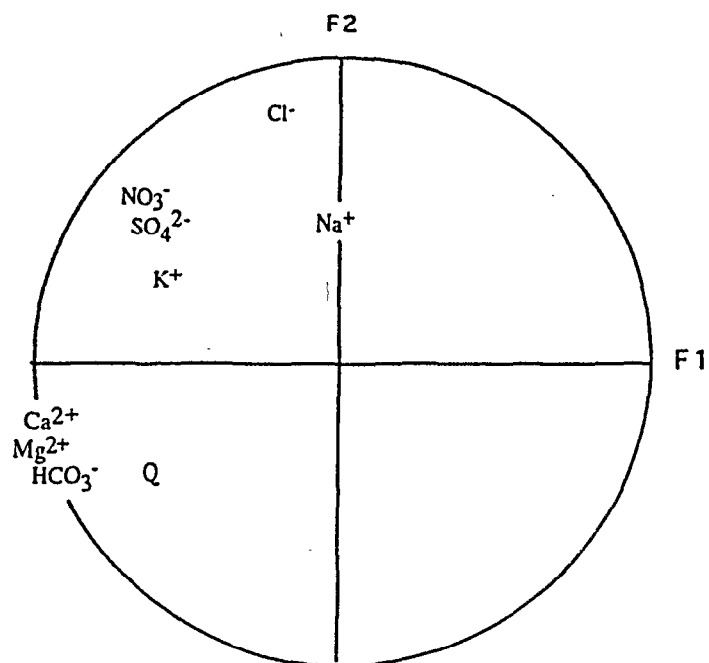


Espace des variables

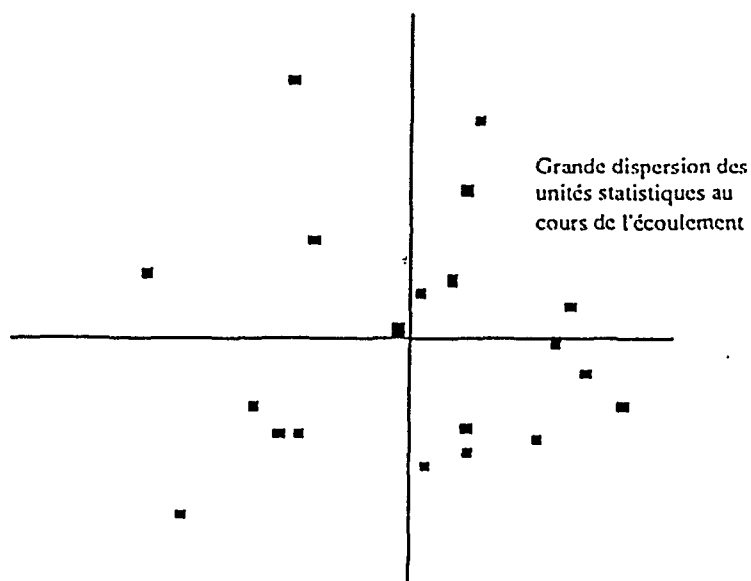


Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,34 : ACP de la crue du 25 au 27 juillet 1988

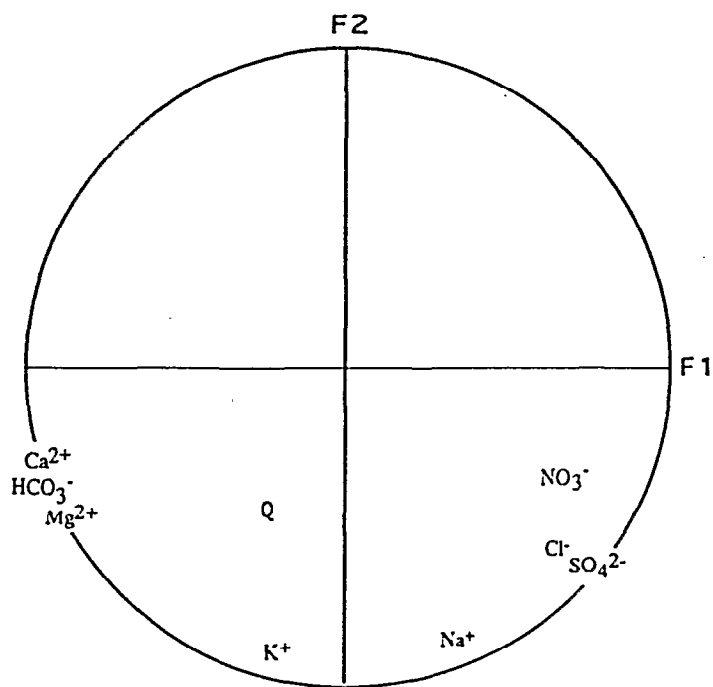


Espace des variables

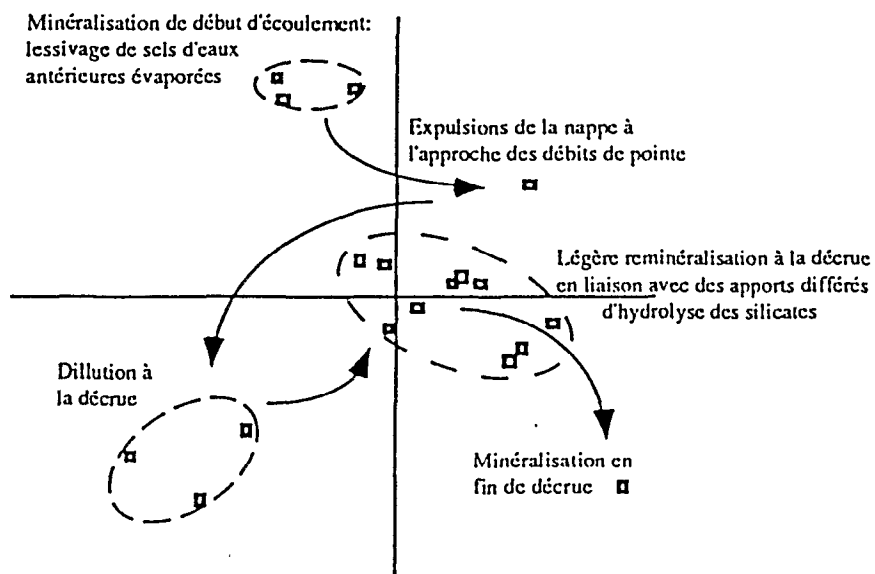


Espace des unités statistiques

ANNEXE 4-A.III,35 : ACP de la crue du 16 au 18 août 1988

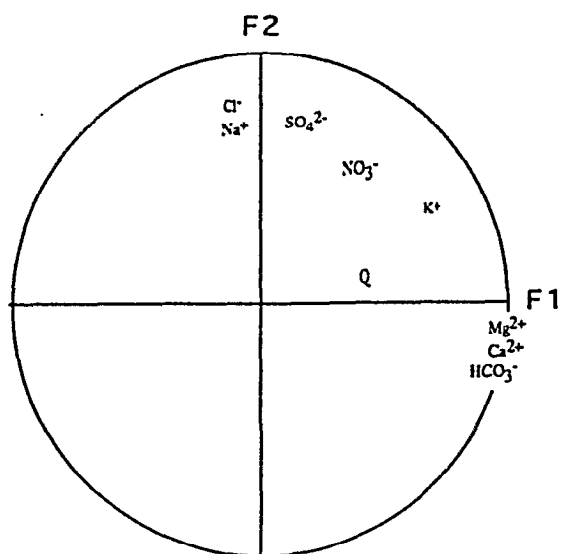


Espace des variables

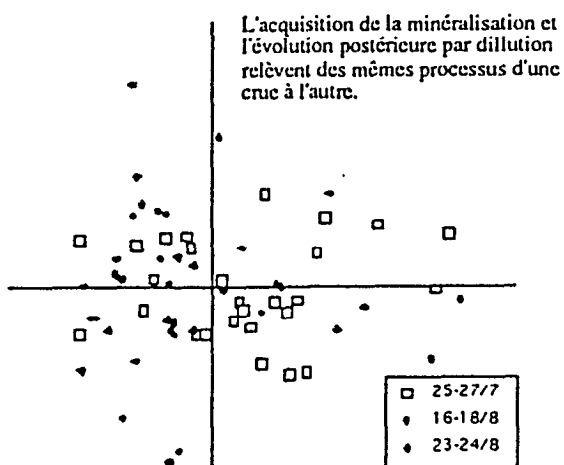


Espace des unités statistiques

Annexe 4-A.III,36 : ACP de la crue du 23 au 24 août 1988



Espace des variables



Espace des unités statistiques

MATRICE DE CORRELATION - ENSEMBLE DES CRUES DE 1988

	Q	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	K	Na
Q	1,000								
HCO ₃	0,221	1,000							
Cl	-0,122	-0,194	1,000						
NO ₃	0,096	0,187	0,171	1,000					
SO ₄	0,207	-0,006	0,358	0,594	1,000				
Ca	0,297	0,919	-0,139	0,260	-0,002	1,000			
Mg	0,413	0,920	-0,166	0,249	0,069	0,959	1,000		
K	0,180	0,492	0,294	0,321	0,108	0,617	0,560	1,000	
Na	0,130	-0,219	0,571	0,059	0,298	-0,182	-0,106	0,219	1,000

POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUE PAR LES AXES PRINCIPAUX

AXE 1	AXE 2	AXE 3
39,4	24,3	12,5

ANNEXE 4-A.III,37 : ACP de l'ensemble des crues de 1988

ANNEXE 4-A.III,38 : TRAITEMENT DES EAUX PRÉLEVÉES

I) SUR LE TERRAIN:

1) Sur les eaux de pluie:

Les eaux recueillies dans les pluviomètres, immédiatement après la précipitation aux postes synoptiques du Téloua, sont conditionnées à refus dans des flacons en verre fumé de 20 ml à double bouchage pour éviter les échanges avec l'atmosphère. Afin de renforcer cet effet, le stockage des bouteilles s'effectue tête en bas, en évitant autant que possible les températures excessives. Un teste effectué sur le conditionnement d'une même eau de pluie; un flacon ayant été conservé au réfrigérateur, l'autre non; n'a pas produit d'effet significatif. La différence des résultats d'analyse étant restée inférieure à la précision analytique (0,2 δ ‰ pour l'oxygène).

2) Sur les eaux d'écoulement:

Rapidement, sous 48 heures maximum, à la faveur de la nuit pour limiter les échanges évaporatoires, l'eau des flacons de base est transvasée, pour 20 ml, dans les mêmes conditions que précédemment, pour l'analyse isotopique. L'importante fraction restante est filtrée en dépression à 0,45 μ et deux flaconnages polyéthylène de 60 ml sont préparés pour la chimie. Sur le reliquat d'eau est effectuée une mesure d'alcalinité par titration. Le stockage est ensuite réalisé à l'abri de la lumière pour éviter le développement de micro organismes qui pourraient modifier le chimisme des eaux.

II) EN LABORATOIRE:

1) Les analyses isotopiques:

Elles ont été réalisées au LHGI (Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique) de l'Université Paris Sud à Orsay, en priorité compte tenu des risques toujours possibles d'évaporation.

a) L'oxygène 18:

. Préparation: Trois ml d'eau, placés dans des bulles porte échantillon (pe) avec robinet étanche, subissent trois dégazages successifs forcés (sous vide) entrecoupés de phases de congélation, avant introduction de CO₂ industriel, et équilibration à 25° C durant 24 heures (Epstein et Mayeda, 1983).

. Le passage au spectromètre de masse atomique du CO₂ substitué à l'oxygène permet sous 48 heures d'obtenir la teneur relative en isotopes lourds, en part pour mille, du Vienne Standard SMOW (‰ Vs SMOW). L'erreur analytique permise étant de 0,2 ‰

b) Le Deutérium:

Les analyses sont réalisées dans les délais les plus courts sur les flacons déjà ouverts pour les analyses d'oxygène 18.

la préparation consiste à introduire 8 µl d'eau, sous argon, dans un porte échantillon en verre contenant 250 mg d'un alliage granulé et calibré de zing préalablement conservé sous vide. Les "pe" sont congelés à l'azote liquide afin de fixer l'eau au zing avant de procéder au dégazage des indésirables (argon, air). Les "pe" ramenés à température ambiante sont mis au four à 470° C durant une heure (Coleman et al., 1982).

La réaction d'oxydation du Zing par l'oxygène de l'eau permet de dissocier l'hydrogène sous forme gazeuse qui, introduite sous 48 heures dans le spectromètre de masse, permet d'effectuer le comptage des atomes lourds.

Comme pour l'oxygène 18, la mesure est exprimée en part pour mille par rapport au SMOW de Vienne. Mais l'erreur analytique admise est, compte tenu des teneurs relatives 10 à 20 fois plus élevées, d'un facteur dix plus importante (2‰).

2) les analyses chimiques:

Elles se résument à la détermination des ions majeurs.

a) Les anions ont été traités au LHGI par chromatographie en phase liquide.

Le transit de l'échantillon au travers d'une colonne sélective permet de séparer et de quantifier le signal (pic) émis par le passage des différents ions, en comparaison d'un signal standard.

b) Les cations ont été traités pour partie, suivant la même méthode au laboratoire de chimie de l'ORSTOM à Bondy, et en double (chromatographie en phase liquide) et spectrophotométrie d'absorption atomique à l'INRA de Thonon les Bains.

La qualité de la mesure est vérifiée par le calcul de la balance ionique (en méq/l); les concentrations anioniques et cationiques devant être équilibrées à ± 10 % près.

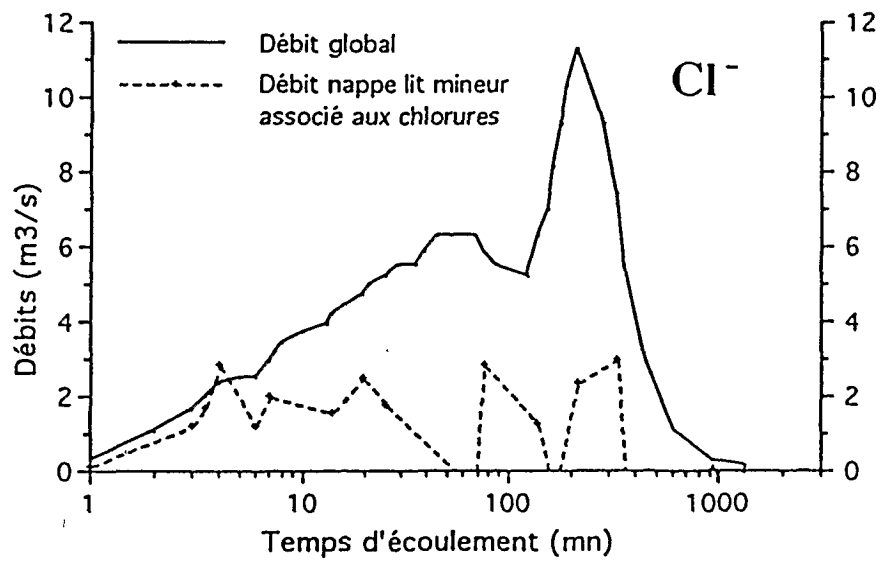
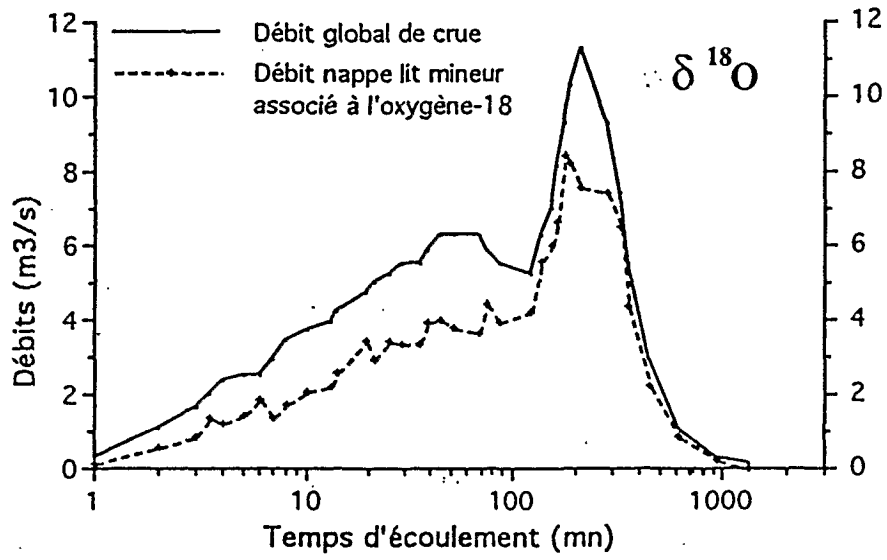
$$[2 \times (\sum \text{Cat} - \sum \text{An}) / (\sum \text{Cat} + \sum \text{An})] \times 100$$

H:mn	T (mn)	Q mes. (m3/s)	dont Q lit maj.	Oxy-18 (‰)	Cl (mg/l)	NO3 (mg/l)	Q.P0 (Oxy)	Q.P1 (Oxy)	ΣPOP1 (Oxy)	Q.P0 (Cl)	Q.P1 (Cl)	Σ POP1 (Cl)	Q.P0 (NO3)
21:20	20	0,05											
21:26	26	1,05		-0,61	1,15	9,06	0,17		0,17	0,45		0,45	1,26
21:29	29	1,61		-0,87			0,42		0,42				2,68
21:31	31	1,98		-1,00	1,33	0,00	0,62		0,62	1,07		1,07	3,30
21:32	32	2,53		-0,68	1,19	13,43	0,48		0,48	1,16		1,16	2,47
21:40	40	2,90		-0,50	0,96	5,97	0,35		0,35	0,92		0,92	3,94
21:53	53	3,16		-0,97	1,14	9,73	0,96		0,96	1,34		1,34	3,69
21:54	54	5,50		-0,63	1,20	6,95	0,94		0,94	2,54		2,54	7,20
21:55	55	11,90		-1,11			4,24	0	4,24				19,82
21:57	57	13,90	0,95	-1,29	1,06	6,40	5,52	0,26	5,78	4,89	0,25	5,14	17,32
21:59	59	17,90	2,95	-0,99			4,64	0,58	5,22				24,90
22:01	61	21,30	4,65	-0,90	0,99	10,30	4,58	0,81	5,39	5,54	1,10	6,64	18,95
22:04	64	26,40	7,20	-1,68	0,84	7,04	11,09	2,64	13,72	4,70	1,25	5,96	25,06
22:05	65	29,50	8,75	-1,61			11,42	3,05	14,47				34,57
22:10	70	31,50	9,75	-1,37			9,95	2,83	12,77				36,23
22:14	74	32,80	10,40	-0,82	1,28	12,10	5,47	1,61	7,08	11,33	3,74	15,07	23,43
22:18	78	34,00	11,00	-1,21	1,99	10,46	9,09	2,76	11,85	21,51	7,31	28,82	25,98
22:31	91	31,50	9,75	-1,03			7,08	2,01	9,09				36,23
22:42	102	30,50	9,25	-1,02			6,84	1,89	8,72				35,40
22:58	118	27,40	7,70	-1,57	1,60	0,00	10,54	2,61	13,15	13,78	3,83	17,61	32,82
23:35	155	27,40	7,70	-1,58			10,61	2,63	13,24				32,82
00:25	205	24,40	6,20	-1,36			8,25	1,78	10,04				30,32
02:26	326	16,50	2,25	-1,48			7,13	0,71	7,84				23,74
03:54	414	10,80		-1,63			6,03		6,03				17,99
06:34	574	6,64		-1,58			3,58		3,58				11,06
09:22	742	3,68		-1,72	1,57	11,09	2,18		2,18	2,50	0,00	2,50	4,04
09:52	772	9,81		-1,77			6,01		6,01				16,34
09:55	775	11,90		-1,82	1,61	12,82	7,52		7,52	8,37	0,00	8,37	12,01
10:02	782	14,40	1,20	-1,74	1,39	10,06	7,93	0,46	8,39	7,61	0,49	8,10	15,19
10:14	794	17,90	2,95	-1,83			9,50	1,19	10,69				24,90
10:36	816	21,30	4,65	-2,17	1,42	15,74	12,78	2,26	15,04	9,85	1,95	11,81	14,30
15:46	1126	14,40	1,20	-1,41	2,98	10,64	6,24	0,36	6,60	20,13	1,30	21,43	14,79
22:49	1549	9,81		-1,69			5,70		5,70				16,34
09:50	2210	3,42		-1,48	1,19	27,49	1,71		1,71	1,56		1,56	0,88

ANNEXE 4-B.II,1 Données-calculs de la décomposition de l'hydrogramme de la crue du 28-30/7/90

H:mn	T (mn)	Q mes (m3/s)	Oxyg-18 (δ ‰)	Cl ⁻ (mg/l)	NO3 ⁻ (mg/l)	Q.P0 (Oxy)	Q.P0 (Cl)	Q.P0 (NO3)
21:01	1	0,25	0,29	1,678	10,715	0,15	0,17	0,35
21:02	2	1,05	0,41			0,59		
21:03	3	1,61	0,49	1,761	19,609	0,87	1,23	4,12
21:03	4	1,98	-0,08	1,876	23,993	1,35	1,73	6,21
21:04	4	2,35	0,58	2,244	21,998	1,22	2,87	6,75
21:05	5	2,53	0,41			1,42		
21:06	6	2,53	-0,25	1,467	13,396	1,83	1,22	4,40
21:07	7	2,90	0,82	1,693	9,955	1,34	2,02	3,73
21:08	8	3,42	0,65			1,72		
21:10	10	3,68	0,39			2,09		
21:13	13	3,94	0,44			2,19		
21:14	14	4,20	0,18	1,353		2,60	1,57	
21:19	19	4,72	-0,24	1,513	12,809	3,40	2,49	7,85
21:21	21	4,98	0,28			2,96		
21:25	25	5,24	0,05	1,320	17,742	3,41	1,80	12,1
21:29	29	5,50	0,22			3,35		
21:35	35	5,50	0,22			3,35		
21:38	38	5,88	-0,01			3,91		
21:44	44	6,26	0,09			4,01		
21:52	52	6,26	0,22			3,81		
22:08	68	6,26	0,35	0,879	10,945	3,61	-0,48	8,87
22:15	75	5,88	-0,37	1,476	16,053	4,43	2,89	12,3
22:26	86	5,50	-0,19			3,90		
23:02	122	5,24	-0,58			4,22		
23:19	139	6,26	-0,94	1,175	18,351	5,59	1,28	15,0
23:33	153	7,02	-0,78			5,99		
23:43	163	8,16	-0,61	0,870	15,815	6,62	-0,70	16,8
23:56	176	9,30	-1,00			8,44		
0:09	199	10,30	-0,54			8,18		
0:35	225	11,30	-0,03	1,181	18,929	7,57	2,38	27,9
1:41	291	9,30	-0,57			7,46		
2:26	336	7,40	-0,90	1,387	16,043	6,53	3,01	15,5
3:00	370	5,50	-0,51	0,950	23,936	4,33	-0,05	17,2
4:36	466	2,90	-0,45			2,24		
7:21	631	1,05	-0,51			0,83		
12:24	934	0,25	-0,18	1,265	19,536	0,18	0,07	0,64
18:45	1315	0,15						

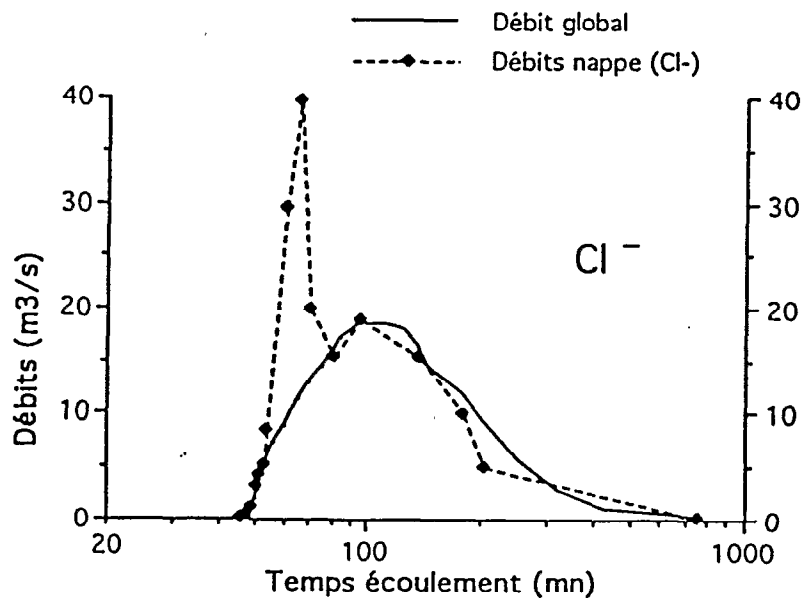
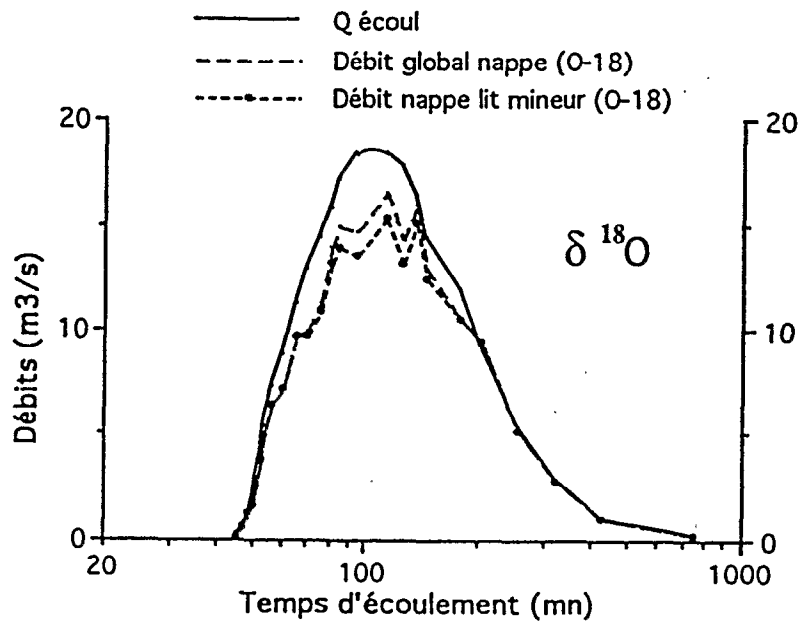
ANNEXE 4-B.II, 2 Données-calculs de la décomposition de l'hydrogramme de la crue du 13-14/8/90



ANNEXE 4-B.II, 3 Décompositions de l'hydrogramme de crue du 13 au 14/8/1990 à AZEL

H:mn	T (mn)	Q mes. (m ³ /s)	dont Q lit maj.	Oxy-18 (‰)	Cl (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	Q.P0 (Oxy)	Q.P1 (Oxy)	ΣPOP1 (Oxy)	Q.P0 (Cl)	Q.P1 (Cl)	Σ POP1 (Cl)	Q.P0 (NO ₃)
18:45	45	0,15											
18:46	46	0,20		-0,86	1,449	21,070	0,24		0,24	0,23		0,23	0,35
18:47	47	0,56		-0,45	1,422	15,408	0,61		0,61	0,63		0,63	-0,56
18:49	49	1,05		-0,80	1,562	30,238	1,25		1,25	1,31		1,31	6,50
18:50	50	1,98		0,29	2,044	15,491	1,70		1,70	3,29		3,29	-1,91
18:51	51	2,90		0,19	1,865	11,771	2,57		2,57	4,37		4,37	-8,04
18:53	53	4,20		0,10	1,614	18,055	3,84		3,84	5,43		5,43	1,17
18:54	54	5,50		0,15	1,943	21,579	4,95		4,95	8,66		8,66	10,9
18:56	56	7,40		0,22			6,50		6,50				
19:00	60	8,92		0,46	3,987	70,065	7,19		7,19	29,6		29,63	227
19:05	65	11,3		0,29	4,227	72,419	9,69		9,69	39,9		39,86	301
19:10	70	12,9	0,20	0,57	1,901	12,927	9,81	0,14	9,95	19,6	0,33	19,88	-28,1
19:15	75	14,4	0,60	0,52			10,9	0,43	11,3				
19:20	80	15,8	0,95	0,20	1,236	12,462	13,1	0,76	13,9	14,4	1,00	15,42	-36,2
19:25	85	17,2	1,30	0,24			13,9	1,02	14,9				
19:35	95	18,5	1,62	0,48	1,285	16,009	13,5	1,17	14,7	17,1	1,78	18,87	-12,1
19:52	112	18,5	1,62	0,13			15,3	1,32	16,6				
20:04	124	17,9	1,48	0,47			13,2	1,07	14,3				
20:14	134	16,5	1,12	-0,10	1,194	16,986	15,0	0,99	16,0	14,4	1,13	15,52	-3,69
20:24	144	14,4	0,60	0,16			12,4	0,49	12,9				
20:58	178	11,9		0,22	1,105	19,146	10,5		10,5	10,2		10,22	9,62
21:21	201	9,30		-0,26	0,750	17,070	9,53		9,53	5,17		5,17	-1,85
22:13	254	5,50					5,20		5,20				
23:16	317	2,90					2,74		2,74				
1:07	428	1,05					0,99		0,99				
6:26	747	0,20			1,226	13,128	0,19		0,19	0,19		0,19	-0,42

ANNEXE 4-B.II,4 Données-calculs de la décomposition de l'hydrogramme de la crue du 14-15/8/90



ANNEXE 4-B.II,5 Décomposition de l'hydrogramme
 de crue du 14 au 15/8/1990 à Azel

Références pluies du bassin du Téloua

Date pluie Azel	Qantité (mm)	Oxy-18 ($\delta \text{‰}$)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	K 20° (μs)
23/07/90	1,6	1,11	3,38	0,10	237
28/07/90	10,4	-0,19	0,43	32,50	70
13/08/90	1,6	2,08	0,10	28,25	75
14/08/90	0,0				
Pluies Dabaga	Qantité (mm)	Oxy-18 ($\delta \text{‰}$)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	K 20° (μs)
23/07/90	21,0	-2,91	1,17	22,34	57
28/07/90	2,0	7,01	8,63	31,95	106
13/08/90	6,0	2,71	0,96	0,21	134
14/08/90	8,3	3,12	0,10	17,48	45
Pluies Aoudéras	Qantité (mm)	Oxy-18 ($\delta \text{‰}$)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	K 20° (μs)
22/07/90	2,5	-2,56	1,11	0	300
24/07/90	5,4	2,32	2,78	0	148
28/07/90	2,4	2,63	2,31	39,70	97
13/08/90	1,2	1,49	1,94	21,62	176
14/08/90	0,5	6,98	3,61	68,32	245
Pluies Abardok	Qantité (mm)	Oxy-18 ($\delta \text{‰}$)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	K 20° (μs)
23/07/90	5,00	0,55	1,81	8,18	148
24/07/90	8,20	0,79	9,85	20,95	294
25/07/90	2,00	0,84	8,85	28,65	150
27/07/90	1,00	5,95	3,99	75,11	168
13/08/90	1,50	5,33	3,81	49,31	159

Références de la nappe à Azel

Piézo 0	Oxy-18 ($\delta \text{‰}$)	Cl ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	K 20° (μs)
28/07/90	-2,77	2,10	14,45	12,99	70
13/08/90	-1,38	2,01	16,43	7,79	135
14/08/90	-0,18	1,27	11,09	19,54	121
Piézo 1	Oxy-18 ($\delta \text{‰}$)	Cl ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	K 20° (μs)
28/07/90	-4,26	2,78	17,67	26,20	132
13/08/90	-2,47	9,47	23,59	5,21	114
14/08/90	-0,54	1,18	11,50	18,93	128

ANNEXE 4-B.II,6 Références pluviométriques et piézométriques utilisées dans les calculs de séparation des écoulements du Téloua en 1990

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX du Chapitre 1

Tab.	Pages
1-B.1: Porosité du lit majeur du Téloua à Azel.....	Page.....25
1-B.2: Granulométrie du lit majeur du kori Téloua.....	..... 26
1-B.3: Granulométrie du lit mineur du kori Téloua.....	..... 26
1-B.4: Granulométrie du lit mineur du kori Tamazalak.....	..... 26

TABLEAUX du Chapitre 2

Tab.	Page.....
2-A.1: Insolation à Agadez.....	33
2-A.2: Trouble atmosphérique à Agadez, période 1953-1960.....	..... 34
2-A.3: Températures à Agadez, période 1951-1970.....	..... 35
2-A.4: Températures à Iférouane, période 1955-1970.....	..... 35
2-A.5: Températures à Agadez, période 1977-1988.....	..... 36
2-A.6: Températures à Agadez, période 1961-1970.....	..... 37
2-A.7: Vitesse moyenne mensuelle du vent à Agadez.....	..... 38
2-A.8: Humidité relative à Agadez, période 1961-1988.....	..... 39
2-A.9: Humidités à Tin Telloust entre juillet 1975 et avril 1976.....	..... 42
2-A.10: Evaporations piche et bac à Agadez.....	..... 44
2-A.11: Evaporations moyennes mensuelles à Iférouane en 1959-1960.....	..... 45
2-A.12: Evaporation piche à Agadez de 1953 à 1988.....	..... 46
2-A.13: Evaporations moyennes mensuelles à Azel et Agadez, période 1984-88..	..... 47
2-A.14: Evaporation bac à In Doudou et Agadez de 1978 à 1980.....	..... 48
2-A.15: Evaporation piche à Iférouane et Agadez de 1953 à 1970.....	..... 49
2-A.16: ETP Penman et Turc à Agadez.....	..... 51
2-A.17: ETP Penman et Turc à Agadez, période commune 1978-1982.....	..... 51
2-A.18: Reconstitution de l'ETP Penman à Azel, période 1984-1990.....	..... 54
2-A.19: Distributions statistiques des pluies annuelles de l'Aïr.....	..... 62
2-A.20: Altitude et pluviométrie sur le massif de l'Aïr en 1980.....	..... 63
2-A.21: Distributions statistiques des pluies excédentaires de l'Aïr.....	..... 64
2-A.22: Distributions statistiques des pluies déficitaires de l'Aïr.....	..... 65
2-A.23: Fréquences caractéristiques des pluies aux postes du Téloua.....	..... 66
2-A.24: Fréquences caractéristiques des pluies moyennes du Téloua.....	..... 66
2-A.25: Pluies moyennes du Téloua et d'Agadez de 1959 à 1990.....	..... 67
2-A.26: Fréquences caractéristiques des pluies moyennes des BV de Tabelot.....	..... 67
2-A.27: Fréquences caractéristiques des pluies moyennes du BV de Timia 1.....	..... 68

TABLEAUX du Chapitre 2 (suite)	Pages
2-A.28: fréquences caractéristiques des pluies moyennes des BV d'Iférouane..	..... 69
2-A.29: Répartition des pluies moyennes mensuelles à Agadez.....	..... 69
2-A.30: Répartition des pluies moyennes mensuelles à Iférouane.....	..... 70
2-A.31: Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Agadez.....	..... 72
2-A.32: Distributions statistiques des pluies mensuelles d'Iférouane.....	..... 73
2-A.33: Distributions des pluies mensuelles (déficitaires) d'Agadez.....	..... 74
2-A.34: Nombre moyen mensuel de jours de pluie à Agadez.....	..... 74
2-A.35: Nombre moyen mensuel de jours de pluie à Iférouane.....	..... 75
2-A.36: Classement des pluies à Agadez et Iférouane avant 1960.....	..... 76
2-A.37: Distribution des pluies journalières de l'Aïr (séquence humide).....	..... 77
2-A.38: Distribution des pluies journalières de l'Aïr (séquence sèche).....	..... 77
2-A.39: Distribution des plus fortes pluies à Agadez.....	..... 78
2-A.40: Distribution des plus fortes pluies à Iférouane.....	..... 79
2-A.41: Intensités et durées de l'averse à Agadez.....	..... 80
2-A.42: Intensités-durées de l'averse du 6/8/59 à Razel.....	..... 80
2-A.43: Intensités en fonction de l'altitude dans l'Aïr en 1959.....	..... 80
2-A.44: Distribution des intensités dans l'Aïr.....	..... 82

TABLEAUX du Chapitre 3	Pages
-------------------------------	--------------

Tab.

3-A.1: Relation pluie-écoulement sur le BVR d'Acharak.....	Page.....101
3-A.2: Ecoulements et pertes annuelles de Dabaga à Azel entre 1980 et 1988.....	..... 101
3-A.3: Bilan des volumes écoulés et des pertes d'Azal à N'Douna entre 77 et 79	..... 103
3-A.4: Bilan des volumes écoulés entre Azel et N'Douna en 1980.....	..... 103
3-A.5: Caractéristiques statistiques des volumes écoulés sur le bassin du Téloua	..... 105
3-A.6: Ecoulements annuels dans la région sud-Aïr.....	..... 106
3-A.7: Distributions des pluies moy. et des lames écoulées des BV centre et sud-Aïr...	108
3-A.8: Distributions des pluies moy. et des lames écoulées des BV est-Aïr.....	..... 109
3-A.9: Distributions des pluies moy. et des lames écoulées des BV nord-Aïr.....	..... 109
3-A.10: Distributions des débits maxima annuels sur le bassin du Téloua.....	..... 110
3-A.11: Caractéristiques des crues maximales des BVR de Razel.....	..... 110
3-A.12: Caractéristiques des crues décennales des BVR de Razel.....	..... 111
3-A.13: Caractéristiques des crues maximales des BV de Timia.....	..... 111
3-A.14: Caractéristiques des crues maximales de la région centre-Aïr.....	..... 112
3-A.15: Caractéristiques des crues maximales de la région est-Aïr.....	..... 112
3-A.16: Caractéristiques des crues maximales de la région nord-Aïr.....	.....113
3-A.17: Relations pluies max/pluies moyennes/débits max des BV de l'Aïr.....	..... 114
3-A.18: Débits caractéristiques des plus forts écoulements de l'Aïr.....	..... 115

TABLEAUX du Chapitre 4**Pages****Tab.**

4-A.1: Effet de masse sur les pluies du Téloua en 1990.....	Page.....133
4-A.2: Situation et pluie moyenne des postes, depuis 1978, dans le nord du Niger ...	135
4-A.3: Matrice de corrélation d'un ensemble de trois crues en 1988.....	.....174

Tab.

4-B.1: Tarissement de la nappe du lit majeur à Azel.....	Page.....179
4-B.2: Valeur des signaux pluie-nappe de la crue du 28 au 30/7/90.....	..... 184
4-B.3: Valeur des signaux au début de la crue du 28 au 30/7/90.....	..... 186
4-B.4: Valeur des signaux pluie-nappe de la crue du 13 au 14/8/90.....	..... 188
4-B.5: Valeur des signaux pluie-nappe de la crue du 14 au 15/8/90.....	..... 190

TABLE DES FIGURES

FIGURES du Chapitre 1

Pages

Fig.

1-A.1: Situation de l'Aïr.....	Page.....6
1-A.2: Coupe type des lit et berge des koris de l'Aïr.....	..... 7
1-A.3: Réseau hydrographique, principaux reliefs et localités de l'Aïr.....	..... 8
1-A.4: Schéma géologique de l'Aïr.....	..... 11
1-A.5: Schéma de circulation au dessus de l'Afrique occidentale.....	..... 18
1-A.6: Coupe topographique de l'Aïr et mouvement des masses d'air.....	..... 23

FIGURES du chapitre 2

Fig.

2-A.1: Durée d'insolation à Agadez, avant et après le début de la sécheresse... Page.....	34
2-A.2: Evolution de la vitesse moyenne du vent à Agadez entre 1950 et 1988.....	..... 38
2-A.3: Vitesse moyenne mensuelle du vent à Agadez entre 1950 et 1988.....	..... 39
2-A.4: Evolution des humidités relatives de l'air, à Agadez, depuis 1961.....	..... 40
2-A.5: Humidité des années 50 à Agadez et Iférouane.....	..... 41
2-A.6: Evolution des humidités relatives à Tin tellous entre juillet 75 et avril 76.....	..... 41
2-A.7: Pourcentages d'évapoartion piche nocturne à Azel en 1987.....	..... 43
2-A.8: Evaporations moyennes journalières à Agadez entre 1977 et 1988.....	..... 44
2-A.9: Evaporations piche et bac à Iférouane en 1959-1960.....	..... 45
2-A.10: Evolution de l'évaporation piche à Agadez de 1953 à 1988.....	..... 46
2-A.11: Evaporations piche et bac à Agadez entre 1977 et 1988.....	..... 47
2-A.12: Evaporation piche à Agadez et Azel entre 1984 et 1988.....	..... 48
2-A.13: Evaporation bac à Agadez et In Doudou entre 1978 et 1980.....	..... 49
2-A.14: Evaporation piche à Agadez et Iférouane entre 1953 et 1970.....	..... 50
2-A.15: ETP Penman et Turc à Agadez entre 1978 et 1982.....	..... 51
2-A.16: Evolution des rayonnements global et net à Azel.....	..... 52
2-A.17: Variation des températures, sol et air à Azel en 1990.....	..... 52
2-A.18: ETP Penman à Azel et Agadez entre 1984 et 1988.....	..... 54
2-A.19: Evaporation dans la zone non saturée.....	..... 56
2-A.20: Précipitations annuelles cumulées d'Agadez depuis 1922.....	..... 58
2-A.21: Précipitations annuelles cumulées d'El Méki de 1950 à 1985.....	..... 59
2-A.22: Précipitations annuelles cumulées à Tabelot de 1968 à 1989.....	..... 60
2-A.23: Précipitations annuelles cumulées d'Iférouane depuis 1940.....	..... 61
2-A.24: Distributions statistiques des pluies annuelles d'Agadez.....	..... 63
2-A.25: Distributions statistiques des pluies annuelles d'Iférouane.....	..... 64

FIGURES du Chapitre 2 (suite)	Pages
2-A.26: Relation pluie moyenne sur le BV du Téloua, pluie annuelle à Agadez.....	67
2-A.27: Relation pluie moyenne BV de Timia "1", BV du Téloua.....	68
2-A.28: Pluviométrie mensuelle à Agadez; périodes humide et sèche.....	70
2-A.29: Pluies moyennes mensuelles d'Iférouane; périodes humide et sèche.....	71
2-A.30: Distributions statistiques des pluies de juillet à Agadez.....	72
2-A.31: Distributions statistiques des pluies de juillet à Iférouane.....	73
2-A.32: Nombre moyen de jours de pluie à Agadez.....	75
2-A.33: Hyétoگرامme de l'averse du 6/8/59 à Razel.....	81

Fig.

2-B.1: Hypsométrie des bassins d'Iférouane.....	Page.....87
2-B.2: Hypsométrie des bassins de Timia.....	88
2-B.3: Hypsométrie des bassins de Tabelot.....	89
2-B.4: Hypsométrie du bassin du Téloua.....	91
2-B.5: Hypsométrie du bassin d'Acharak.....	92
2-B.6: Hypsométrie du bassin d'Azamella.....	93

FIGURES du chapitre 3

Fig.

3-A.1: Hydrogramme de la crue du 16-17/8/79 sur Tamgak S1.....	Page.....95
3-A.2: Hydrogramme de la crue du 21/8/79 sur Timia S1.....	95
3-A.3: Hydrogrammes de l'événement du 24-26/6/79 sur les BV d'Iférouane.....	96
3-A.4: Perte des écoulements dans le piémont des monts Tamgak.....	97
3-A.5: Hydrogrammes de la crue du Téloua du 2 au 4/7/79.....	99
3-A.6: Volume des pertes du BVI en fonction des volumes écoulés à Dabaga.....	102
3-A.7: Volume écoulé aux radiers en fonction des volumes d'Azal et du BVI.....	103
3-A.8: Distribution des volumes écoulés annuels du Téloua à Azal.....	105
3-A.9: Lamme écoulée en fonction de la pluie moyenne; régions centre et sud-Aïr..	107
3-A.10: Distribution de la pluie moyenne du bassin du Téloua à Azal.....	108
3-A.11: Pluies moyennes en fonction des pluies maximales sur le BV d'Acharak.....	114

Fig.

3-B.1: Concentrations max des suspensions en fonction des débits max à Azal.....	119
3-B.2: Granulométrie des suspensions de la crue du 13/8/89.....	119
3-B.3: Granulométries cumulées de la crue du 13/8/89.....	120
3-B.4: Granulométrie des suspensions de la crue du 23/8/88 à Azal.....	121
3-B.5: Granulométries cumulées de la crue du 23/8/88.....	122
3-B.6: Débits solides maxima en fonction des débits de pointe de crue.....	122
3-B.7: Débit solide de pointe en fonction du volume écoulé de la crue.....	123

FIGURES du Chapitre 3 (suite)	Pages
3-B.8: Flux liquide, solide et matière organique du Téloua à Azel, crue du 13/8/89.....	124
3-B.9: Flux liquide, solide et matière organique du Téloua à Azel, crue du 23/8/88.....	124
3-B.10: Flux de matières transportées en fonction du volume des crues à Azel... ..	125
3-B.11: Relation annuelle entre le transport en suspension et le volume écoulé	125

FIGURES du Chapitre 4

Fig.

4-A.0: Oxygène-18 des eaux de la nappe du Téloua entre Dabaga et Azel.....Page.....	132
4-A.1: Isohyètes et pluviométrie interannuelles, région Aïr et nord-Aïr.....	134
4-A.2: Concentrations anioniques-hauteurs précipitées à Azel en 1988.....	137
4-A.3: Concentrations anioniques-hauteurs précipitées à Aoudéras en 1988.....	138
4-A.4: Relation deutérium-oxygène 18 des pluies de l'Aïr entre 1988 et 1990.....	140
4-A.5: Oxygène-18 des pluies de l'Aïr, en fonction des hauteurs précipitées.....	140
4-A.6: Oxygène-18 annuels pondérés des pluies en fonction de la latitude et de l'alt....	142
4-A.7: Relation des pluies annuelles d'Azal et d'Aoudéras, entre 1979 et 1990.....	144
4-A.8: Oxygène-18 des pluies et températures d'équilibre de l'atmosphère en 1988 ...	145
4-A.9: Oxygène-18 des pluies et températures d'équilibre de l'atmosphère en 1990 ...	145
4-A.10: Oxygène-18 des pluies et humidité relative de l'atmosphère à Azel en 1988...	146
4-A.11: Oxygène-18 des pluies et humidité relative de l'atmosphère à Azel en 1990...	146
4-A.12: Humidité relative et hauteur de précipitation à Azel entre 1988 et 1990.....	147
4-A.13: Activité convective première décade d'août 1988 sur l'Afrique tropicale.....	147
4-A.14: Activité convective troisième décade d'août 1990 sur l'Afrique tropicale	148
4-A.15: Minéralisation et oxygène-18 des pluies d'Aoudéras en 1990.....	149
4-A.16: Profil en travers du Téloua à Azel, positions piézométriques.....	150
4-A.17: Conductivité et piézométrie de la nappe du lit majeur à Azel.....	151
4-A.18: Evolution de la minéralisation de la nappe du lit majeur à Azel.....	152
4-A.19: Physicochimie de la nappe alluviale du Téloua à Azel en 1990.....	153
4-A.20: Chimie des eaux de crues et de nappe du Téloua à Azel en 1990.....	154
4-A.21: Diagramme type Schöeller de la nappe inter-crue du Téloua en 1990.....	155
4-A.22: Evolution isotopique des décrues successives du piézomètre "0".....	156
4-A.23: Evolution isotopique des décrues successives du piézomètre "1".....	157
4-A.24: Evolution isotopique des décrues successives du piézomètre "2".....	158
4-A.25: Composition chimique des eaux du Téloua à Azel en 1988.....	159
4-A.26: Composition chimique des eaux du Téloua à Azel en 1989.....	159
4-A.27: Diagramme type Schöeller des eaux de la crue du 13-14/8/89.....	160
4-A.28: Diagramme type Schöeller des eaux de la crue du 14-15/8/89.....	160
4-A.29: Evolution des ions SO_4^{2-} et Cl^- , durant la crue du 13-14/8/89.....	161
4-A.30: Evolution des ions NO_3^- et Cl^- , durant la crue du 14-15/8/90.....	161

FIGURES du chapitre 4 (suite)	Pages
4-A.31: Evolution des cations au cours de la crue du 13-14/8/89.....	..... 162
4-A.32: Paramètres physicochimiques de la crue du 14-15/8/90.....	..... 163
4-A.33: Alcalinité et température de la crue du 13-14/8/89.....	..... 163
4-A.34: pH de la crue du 24-25/7/90.....	..... 164
4-A.35: Evolution du pH au cours de la crue du 28-30/7/90.....	..... 164
4-A.36: Evolution du pH au cours de la crue du 14-15/8/90.....	..... 165
4-A.37: Evolution du pH et de l'alcalinité de la crue du 28-30/7/90.....	..... 165
4-A.38: Conductivité et alcalinité de la crue du 13-14/8/89.....	..... 166
4-A.39: Conductivité durant la crue du 16-18/8/88.....	..... 166
4-A.40: Faciès isotopiques de deux crues importantes en 1988.....	..... 167
4-A.41: Teneurs en oxygène-18 de la crue du 26-27/8/89.....	..... 167
4-A.42: Teneurs en oxygène-18 de la crue du 13-14/8/89.....	..... 168
4-A.43: Espace des variables de la crue du 24-25/7/90.....	..... 172
4-A.44: Espace des variables de la crue du 14-15/8/90.....	..... 172
4-A.45: Espace des unités statistiques de la crue du 13-14/8/89.....	..... 173
4-A.46: Espace des unités statistiques de la crue du 24-25/7/90.....	..... 173
4-A.47: Espace des unités statistiques de l'ensemble des crues de 1988.....	..... 174

Fig.

4-B.1: Coupe du lit d'un kori et mouvements dans sa nappe alluviale.....	Page..... 177
4-B.2: Profil de porosité du lit majeur.....	..... 180
4-B.3: Conductivités de la crue du 28-30/7/90.....	..... 181
4-B.4: Isotopes de la crue du 28-30/7/90.....	..... 182
4-B.5: Décomposition par l'oxygène-18 de l'hydrogramme du 28-30/7/90.....	..... 185
4-B.6: Décomposition par le chlore de l'hydrogramme du 28-30/7/90.....	..... 186
4-B.7: Décomposition par l'oxygène-18 de l'hydrogramme du 13-14/8/90.....	..... 189
4-B.8: Décomposition par l'oxygène-18 de l'hydrogramme du 14-15/8/90.....	..... 191

TABLE DES ANNEXES

ANNEXES du Chapitre 2	Pages
ANNEXES 2-A:	
2-A.I,1: Températures à Agadez et Iférouane.....	Page..... 217
2-A.II,1: Données climatologiques moy. mens. d'Azal (1984 à 1990).....	..... 218
2-A.III,1: Situation des postes pluviométriques de la région Aïr.....	....., 221
2-A.III,2: Distribution statistique des pluies annuelles à Agadez et El Méki.....	..... 222
2-A.III,3: Distribution statistique des pluies annuelles à Tabelot et Iférouane.....	..... 223
2-A.III,4: Distribution des pluies annuelles, séquences sèche et humide, d'Agadez...	224
2-A.III,5: Distribution des pluies annuelles, séquences sèche et humide, d'El Méki ..	225
2-A.III,6: Distribution des pluies annuelles, séquences sèche et humide, d'Iférouane	226
2-A.III,7: Distribution des pluies annuelles du BV du Téloua (Période 76-90).....	227
2-A.III,8: Relations pluies moyennes des BV de Tabelot, pluie moy. du Téloua.....	228
2-A.III,9: Relations pluies moy. des BV d'Iférouane, pluie moyenne d'Iférouane.....	229
2-A.III,10: Isohyètes annuelles médianes de l'Aïr.....	..... 230
2-A.III,11: Isohyètes décennales sèches de l'Aïr.....	..... 231
2-A.III,12: Isohyètes décennales humides de l'Aïr.....	..... 232
2-A.III,13: Distributions statistiques des pluies de juin et Juillet d'Agadez.....	..... 233
2-A.III,14: Distributions statistiques des pluies d'août et septembre d'Agadez.....	234
2-A.III,15: Distributions statistiques des pluies de juin et Juillet d'Iférouane.....	..... 235
2-A.III,16: Distributions statistiques des pluies d'août et septembre d'Iférouane.....	236
2-A.III,17: Distributions de la pluie annuelle journalière d'Agadez (sèche et humid)..	237
2-A.III,18: Distributions de la pluie annuelle journalière d'El Méki (sèche et humid)..	238
2-A.III,19: Distributions de la pluie annuelle journalière d'Iférouane (sèche et humid)	239
2-A.III,20: Hyétogrammes des pluies de l'Aïr.....	240
ANNEXES 2-B:	
2-B.I,1: Réseau hydrographique de l'Aïr et de l'Ighazer.....	Page.....241
2-B.I,2: Période d'observation des bassins de l'Aïr.....	..... 242
2-B.I,3: Situation des bassins versants étudiés dans l'Aïr.....	..... 243
2-B.I,4: Caractères physiques des bassins de l'Aïr.....	..... 244
2-B.I,5: Réseaux hydrographiques et stations hydropluviométriques de l'Aïr.....	250
2-B.III,1: Géologie du bassin versant du Téloua.....	.... 255

ANNEXES 3-A:

3-A.I,1: Caractéristiques des écoulements à Azel en 1975 et 1976.....	Page.....256
3-A.I,2: Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1977.....	..... 256
3-A.I,3: Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1978.....	..... 257
3-A.I,4: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1979.....	..... 258
3-A.I,5: Caractéristiques des écoulements de la Cuvette d'Agadez en 1979.....	..... 259
3-A.I,6: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1980.....	..... 260
3-A.I,7: Caractéristiques des écoulements du Téloua à Azel en 1980.....	..... 261
3-A.I,8: Caractéristiques des écoulements de la Cuvette en 1980; radier et N'Douna...	262
3-A.I,9: Caractéristiques des écoulements de la Cuvette en 1980; Agassagh. Azam ...	263
3-A.I,10: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1981.....	..... 264
3-A.I,11: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1982.....	..... 265
3-A.I,12: Caract. des écoul. de la Cuvette en 1982; radiers,Agassagh. Azam ...	.....266
3-A.I,13: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1983.....	..... 267
3-A.I,14: Caract. des écoul. de la Cuvette en 1983; radiers,Agassagh. Azam ...	.....268
3-A.I,15: Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1984.....	..... 269
3-A.I,16: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1985.....	..... 269
3-A.I,17: Caract. des écoul. de la Cuvette en 1985; radiers,Agassagh. Azam ...	.....270
3-A.I,18: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1986.....	..... 271
3-A.I,19: Caract. des écoul. de la Cuvette en 1986; radiers,Agassagh. Azam ...	.....272
3-A.I,20: Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1987.....	..... 273
3-A.I,21: Caractéristiques des écoulements du Haut Téloua en 1988.....	..... 274
3-A.I,22: Caract. des écoul. de la Cuvette en 1988; radiers,Agassagh. Azam ...	.....275
3-A.I,23: Caractéristiques des écoulements du Téloua en 1989.....	..... 276
3-A.I,24: Caractéristiques des écoulements du Téloua à Azel en 1990.....	..... 277
3-A.I,25: Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1977.....	..... 278
3-A.I,26: Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1978.....	..... 279
3-A.I,27: Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1979.....	..... 279
3-A.I,28: Caractéristiques des écoulements à Tabelot en 1980.....	..... 279
3-A.I,29: Caractéristiques des écoulements à Tamgak (S1) de 1975 à 1980.....	..... 280
3-A.I,30: Caractéristiques des écoulements à Iberkoum (S2) de 1975 à 1980...	..... 281
3-A.I,31: Caractéristiques des écoulements à Iférouane (S3) de 1975 à 1980...	..... 282
3-A.I,32: Caract. des écoul. sur les BV d'Iférouane; bilan de 1975 à 1980.....	..... 283
3-A.I,33: Caract. des écoul. sur les BV de Timia; bilan de 1976 à 1981.....	..... 283
3-A.I,34: Caractéristiques des écoulements des BV de Timia en 1976.....	..... 284
3-A.I,35: Caractéristiques des écoulements des BV de Timia en 1977.....	..... 284
3-A.I,36: Caractéristiques des écoulements du BV"1" de Timia entre 1978 et 1981...	285

3-A.II,1: Volumes écoulés annuels du Téloua de 1959 à 1990.....	..... 286
3-A.II,2: Débits de pointe annuels sur le BV du Téloua.....	..... 286
3-A.III,1: Relation pluie moyenne-écoulement du bassin du Téloua à Azel.....	..... 287
3-A.III,2: Relation pluie moyenne-écoulement sur le BV du Téloua.....	..... 288
3-A.III,3: Relation pluie moy. du BV du Téloua à Azel-pluie annuelle d'Agadez.....	.....288

ANNEXES 3-B:

3-B.I,1: Données de concentrations antérieures à 1985 sur le Téloua.....	.....289
3-B.I,2: Transports solides en suspension sur le bassin "élèves" en 1985 et 1986 ...	..... 290
3-B.I,3: Transports solides en suspension du Téloua à Azel en 1985 et 1986.....	.....291
3-B.II,1: Principe de la mesure des transports solides sur le Téloua.....	..... 292
3-B.III,1: Transports solides en suspension du Téloua à Azel en 1987 et 1988..	.....295
3-B.III,2: Transports solides en suspension du Téloua à Azel en 1989 et 1990..	.....296

ANNEXES du Chapitre 4

ANNEXES 4-A:

4-A.I,1: Principe des isotopes en milieu naturel.....	Page.....297
4-A.I,2: Processus géochimiques affectant la composition isotopique des eaux..	..... 302
4-A.I,3: Relations chimiques et physico-chimiques des eaux.....	..... 303
4-A.II,1: Isotopes des pluies Aïr et nord-Aïr de 1988 à 1990.....	..... 305
4-A.II,2: Chimie des pluies du Téloua et nord-Aïr de 1988 à 1990.....	..... 312
4-A.II,3: Condition naturelle des eaux de pluie.....	..... 317
4-A.II,3a: Origine et mouvement des éléments ionisés et particuliers de l'air.....	.....318
4-A.II,4: Concent. ioniques des pluies de l'Aïr en fonction des haut. en 88 et 90..	...319
4-A.II,5: Physicochimie des pluies d'Azél en 1990.....	..... 320
4-A.II,6: Physicochimie des pluies d'Aoudéras en 1990.....	..... 321
4-A.II,7: Températures diurnes et au moment de l'averse à Azél en 1990; choix..	...322
4-A.II,8: Minéralisation et oxygène-18 des pluies de l'Aïr en 1990.....	.....323
4-A.III,1: Physicochimie et isotopes de la nappe du Téloua à Azél en 1990.....	.....324
4-A.III,2: Concentrations ioniques des eaux de nappes du Téloua en 1990.....	..... 325
4-A.III,3: Balances Ioniques des eaux de nappes du Téloua en 1990.....	..... 326
4-A.III,4: Physicochimie et isotopes des crues des 25-27/7 et 16-21/8/1988.....	..... 327
4-A.III,5: Physicochimie et isotopes des écoulements du 23 au 26/8/88.....	..... 328
4-A.III,6: Chimie des écoulements de la crue du 25-27/7/1988.....	..... 329
4-A.III,7: Chimie des écoulements de crue des 16-21/8 et 23-24/8/1988.....	..... 330
4-A.III,8: Balances Ioniques des écoulements de la crue du 25-27/7/88.....	..... 331
4-A.III,9: Balances Ioniques des écoulements de crue des 16-21 et 23-24/8/88..	..... 332

ANNEXES du Chapitre 4 (suite)**Pages**

4-A.III,10: Physicochimie et isotopes des crues des 13-14/8 et 26-27/8/1989..	.....333
4-A.III,11: Chimie des écoulements des 13-14/8 et 26-27/8/1989.....	..... 334
4-A.III,12: Balances Ioniques des écoulements des 13-14/8 et 26-27/8/1989...	..... 335
4-A.III,13: Physicochimie et isotopes des crues des 23-25 et 28-30/7/1990...	.....336
4-A.III,14: Physicochimie et isotopes des crues des 13-14 et 14-15/8/1990...	.....337
4-A.III,15: Chimie des écoulements des 23-25/7 et 28-30/7/1990.....	..... 338
4-A.III,16: Chimie des écoulements des 13-14/8 et 14-15/8/1990.....	..... 339
4-A.III,17: Balances Ioniques des écoulements des 24-25/7 et 28-30/7/1990...	..... 340
4-A.III,18: Balances Ioniques des écoulements des 13-14/8 et 14-15/8/1990...	..... 341
4-A.III,19: Diag. triangulaires des eaux (crues et nappes) d'Azél de 1988 à 1990..	...342
4-A.III,20: Diag. type Schœller des crues du Téloua de 1988.....	..... 343
4-A.III,21: Diag. type Schœller des crues du Téloua de 1989.....	..... 344
4-A.III,22: Diag. type Schœller des nappes et crues des 24-25 et 28-30/7/90..	..... 345
4-A.III,23: Diag. type Schœller des crues des 13-14 et 14-15/8/1990.....	..... 346
4-A.III,24: Matrice des crues des 24-25 et 28-30/7/90.....	..... 347
4-A.III,25: ACP de la crue du 24-25 juillet 1990.....	..... 348
4-A.III,26: ACP de la crue du 28-30 juillet 1990.....	..... 349
4-A.III,27: Matrice des crues des 13-14 et 14-15/8/1990.....	..... 350
4-A.III,28: ACP de la crue du 13-14 août 1990.....	..... 351
4-A.III,29: ACP de la crue du 14-15 août 1990.....	..... 352
4-A.III,30: Matrice des crues des 13-14 et 26-27/8/1989.....	..... 353
4-A.III,31: ACP de la crue du 13-14 août 1989.....	..... 354
4-A.III,32: ACP de la crue du 26-27 août 1989.....	..... 355
4-A.III,33: Matrice des crues du Téloua en 1988.....	..... 356
4-A.III,34: ACP de la crue du 25-27 Juillet 1988.....	..... 357
4-A.III,35: ACP de la crue du 16-18 août 1988.....	..... 358
4-A.III,36: ACP de la crue du 23-24 août 1988.....	..... 359
4-A.III,37: ACP de l'ensemble des crues de 1988.....	..... 360
4-A.III,38: Traitement des eaux prélevées.....	..... 361

ANNEXES 4-B:

4-B.II,1: Données-calculs de la décomposition de l'hydrogramme du 28-30/7/90.....	363
4-B.II,2: Données-calculs de la décomposition de l'hydrogramme du 13-14/8/90.....	364
4-B.II,3: Décompositions de l'hydrogramme de crue du 13-14 août 1990.....	..... 365
4-B.II,4: Données-calculs de la décomposition de l'hydrogramme du 14-15/8/90.....	366
4-B.II,5: Décompositions de l'hydrogramme de crue du 14-15 août 1990.....	..... 367
4-B.II,6: Références pluvio et piézo utilisées pour les calculs de séparation en 1990...	368

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1

"LE MILIEU DE L'AÏR"

AVANT PROPOS	1
INTRODUCTION	Page 4
A. SITUATION ET LIMITES	Page 5
I. SITUATION	
II. LIMITES	
B. LE CADRE PHYSIQUE	Page 5
I. LES PAYSAGES	Page 7
II. LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE	Page 7
1) Histoire géologique de l'Aïr:.....	7
2) Les grandes unités géologiques du massif:.....	10
a) Le socle	
b) Les complexes subvolcaniques	
c) Le volcanisme récent	
d) Les formations sédimentaires	
3) Rôle des failles et des fractures:.....	13
III. LE CONTEXTE CLIMATIQUE	Page 14
1) Le point sur les mécanismes aérologiques intertropicaux:.....	14
a) Le bilan radiatif	
b) La circulation méridienne	
c) La circulation zonale	
2) les mécanismes propres aux conditions climatiques sur l'Aïr:.....	19
a) L'hiver	
b) L'été	
c) Les intersaisons	
IV. LES SOLS DE L'AÏR:	Page 22
1) Principes de formation:.....	22
a) La thermoclastie	
b) L'altération dynamique	

2) Les types de sols:.....	24
a) Les sols des reliefs	
b) Les sols de bas de versants	
c) Les sols de fonds de vallées	
CONCLUSION:.....	27
V. LA VEGETATION DE L'AÏR:	Page 28
1) L'Air ne constitue pas un milieu homogène:.....	28
2) L'Air est une région de transition pour la végétation:.....	28
3) La répartition des espèces dans le massif:.....	30
a) En bordure des koris	
– en berge	
– le lit majeur	
– entre les affleurements rocheux et le lit majeur	
b) Sur les versants	
– les têtes de ravines	
– les bas de ravines	
c) Sur les hauteurs	
d) A proximité des points d'eau	
CONCLUSION:.....	32

CHAPITRE 2

"LES COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT"

A_ LES COMPOSANTES CLIMATIQUES LOCALES	Page 33
I. LES DONNEES DE BASE:	Page 33
1) L'insolation:.....	33
2) La température:.....	35
a) Répartitions spatiales et temporelles	
b) Evolution des températures avec la sécheresse:	
c) les températures absolues	
3) Les vents:.....	37
a) Le régime	
b) Les vitesses	
4) L'humidité relative:.....	39
II. L'EVAPORATION:	Page 42

1) Les données disponibles:.....	42
2) Importance et répartition des évaporations:.....	43
a) Des valeurs annuelles fortes	
b) Evaporations journalières et mensuelles	
3) Evolution de l'évaporation:.....	45
a) Evolution dans le temps	
b) Evolution en fonction de la situation	
4) L'évapotranspiration potentielle (ETP):.....	50
5) L'évaporation des sols:.....	55
III. LA PLUIE:	Page 57
1) Les données disponibles:.....	57
2) La tendance actuelle:.....	58
a) La tendance sud-Aïr	
b) La tendance moyen-Aïr	
c) La tendance nord-Aïr	
3) Les pluies annuelles:.....	61
a) Distribution des précipitations annuelles	
b) Répartition des pluies annuelles médianes et décennales	
c) Tracé des isohyètes	
4) Les pluies mensuelles:.....	69
a) Répartition des pluies mensuelles	
b) Distribution statistique des pluies mensuelles	
5) Les pluies journalières:.....	74
a) Répartition des jours de pluie	
b) Distribution quantitatives des pluies journalières	
c) Les pluies annuelles journalières	
d) Les pluies journalières à caractère exceptionnel	
6) Les intensités:.....	79
a) Distribution des intensités en fonction de la durée de l'averse	
b) Morphologie des pluies	
c) Distribution des intensités	
CONCLUSION:.....	83
B. LES BASSINS VERSANTS	Page 83
I. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE L'AÏR:	Page 83
1) Description:.....	83
2) Activité actuelle et passée:.....	84

II. SITUATION ET PERIODE D'OBSERVATION DES BASSINS:	Page	85
III. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES:	Page	85
1) Les bassins d'altitude à forte dénivelée permanente:.....		86
a) Les bassins d'Iférouane		
b) Les bassins de Timia		
c) Les bassins de Tabelot		
2) Les grands bassins (Le Téloua):.....		89
a) La tête du bassin		
b) A l'aval de la confluence des hautes surfaces		
c) De Dabaga à Azel		
d) A Alarcès, la cuvette d'Agadez		
3) Les bassins en bordure de l'Aïr ou affluents de bassins plus importants:...		91
a) Les bassins en bordure sud de l'Aïr		
b) Les bassins affluents des grands émissaires		
CONCLUSION:.....		93

CHAPITRE 3

"LES TRANSFERTS LIQUIDES ET SOLIDES"

A. LES ECOULEMENTS	Page	95
I. CARACTERISTIQUES DES ECOULEMENTS:	Page	95
1) Les écoulements des petites unités:.....		95
2) Premières dégradations des écoulements:.....		96
a) Cas des koris de la région d'Iférouane (nord-Aïr)		
b) Cas des koris de la région de Timia (centre-Aïr)		
c) Cas des koris de la région de Tabelot (est-Aïr)		
3) Un exemple de dégradation sur grand bassin: le cas du Téloua:.....		99
a) scénario des écoulements		
b) Bilan des écoulements		
CONCLUSION:.....		104
II) CARACTERES STATISTIQUES DES ECOULEMENTS:	Page	104
1) Les volumes annuels par secteur:.....		104
a) Région sud-Aïr		
b) Région centre-Aïr		
c) Région est-Aïr		
d) Région nord-Aïr		

2) Les écoulements des bassins insuffisamment observés:.....	106
a) Secteur centre-sud Aïr; Téloua, Tchirozérine, El Méki, Timia	
b) Secteur est-Aïr; Tabelot	
c) Secteur nord-Aïr; Iférouane	
3) Les écoulements maximums:.....	109
a) Les crues annuelles aux stations biens observées	
b) les crues annuelles des bassins peu ou pas observés	
CONCLUSION:.....	115

B. LES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION	Page	116
I. LES MESURES ANTECEDENTES:	Page	116
II. PRINCIPE ET CONDITIONS DE LA MESURE SUR LE TELOUA:	Page	117
III. LES RESULTATS SUR LE BASSIN DU TELOUA:	Page	117
1) Les concentrations:.....	117	
a) Les données acquises avant 1980:		
b) Les données acquises entre 1980 et 1983		
c) Les données acquises à partir de 1985		
2) Les matériaux transportés:.....	119	
a) Les matériaux en suspension de la crue du 13/8/89		
b) Les matériaux en suspension de la crue du 23/8/88		
3) Les débits solides:.....	122	
4) Les flux de matières transportées:.....	125	
5) La dégradation spécifique du bassin:.....	126	
CONCLUSION:.....	127	

CHAPITRE 4

"ETUDES GEOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES"

A. LES MARQUAGES CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE NATURELS	Page	129
I. PRINCIPE DES ISOTOPES, DONNEES GEOCHIMIQUES ANTERIEURES	129	
1) Principe des isotopes du milieu dans les eaux naturelles:.....	129	
2) Les données géochimiques et isotopiques antérieures sur l'Aïr:.....	129	
a) Les caractères chimiques des eaux de l'Aïr		
b) Les faciès chimiques		
c) Les faciès isotopiques des nappes		

d) Le faciès isotopique des pluies

II. APPLICATION AUX PLUIES DE L'AÏR: Page 133

1) Rappels sur la situation pluviométrique régionale:..... 133

a) Situation des postes et collecte de la pluie

b) distribution des précipitations

2) Caractérisation chimique et isotopique des pluies de l'Aïr:..... 136

a) Le caractère chimique des précipitations

b) Le faciès isotopique des pluies de l'Aïr

CONCLUSION:..... 149

III. APPLICATION AUX EAUX DU TELOUA: Page 150

1) Les faciès chimiques et isotopiques:..... 150

a) Les eaux souterraines

b) Les eaux d'écoulement

CONCLUSION:..... 168

2) Analyse statistique multidimensionnelle des écoulements:..... 169

a) Principe

b) Résultats

CONCLUSION:..... 174

B. LA DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE CRUE Page 175

I. PRINCIPE DE LA SEPARATION DES ECOULEMENTS: Page 175

1) Etudes antérieures: 175

2) Principe du calcul: 175

II. CONDITIONS DE L'APPLICATION AUX EAUX DU TELOUA: Page 178

1) Les conditions hydrodynamiques:..... 178

a) Cadre d'intervention des divers secteurs de la nappe

b) Rappels sur les circulations gravitaires et échanges potentiels

2) Le choix des signaux:..... 181

a) Les signaux physico-chimiques

b) Les éléments chimiques majeurs

c) Les isotopes stables ^{18}O et ^2H

3) Le choix des références d'entrée pour le calcul:..... 183

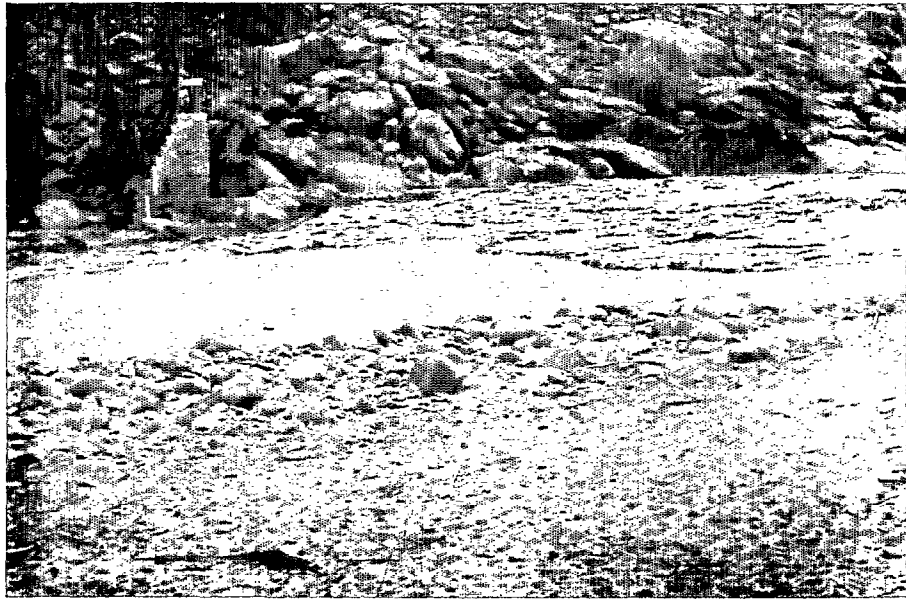
a) La pluie

b) La nappe

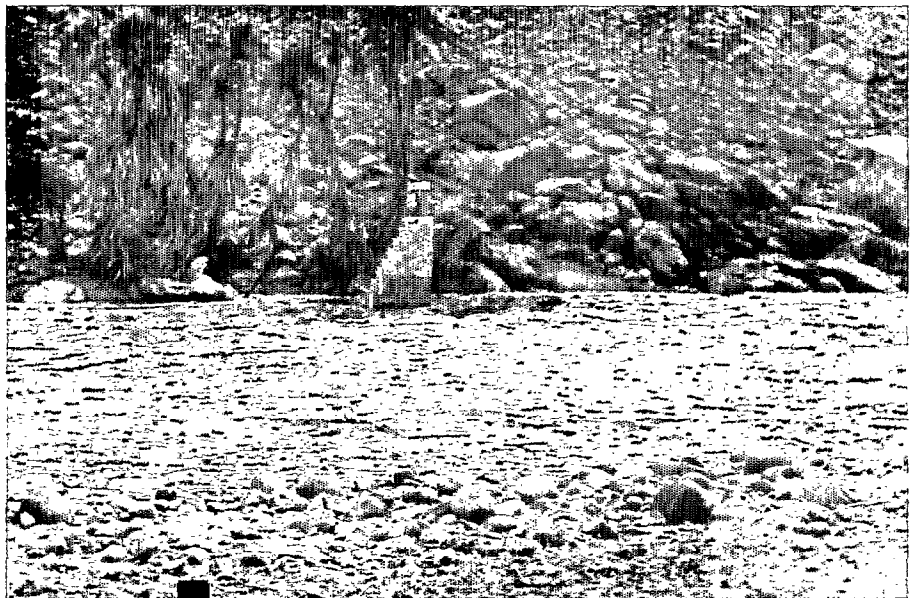
c) Les débits d'écoulement

III. DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE QUELQUES CRUES:.....	183
1) La crue du 28 au 30 juillet 1990:.....	184
a) cadre d'évolution et description de la crue	
b) Origine et signaux	
c) Le calcul	
d) Commentaire et interprétation	
2) La crue du 13 au 14 août 1990:.....	188
3) La crue du 14 au 15 août 1990:.....	190
CONCLUSION:.....	191

CONCLUSION.....	.....Page	193
BIBLIOGRAPHIE.....	.....	197
ANNEXES.....	.....	217
LISTE DES TABLEAUX....	.....	369
TABLE DES FIGURES.....	.....	373
TABLE DES ANNEXES.....	.....	377
TABLE DES MATIERES.....	.....	381
PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES.....	.....	388
RESUMES.....	.....	Couverture



1. Arrivée de la crue à la station, le 28 août 1975 à 16 heures. Le limnigraphe est protégé par une imposante maçonnerie sur laquelle sont bien visibles les éléments "2" et "3" de la batterie d'échelles.



2. La même station, deux minutes plus tard; la cote à l'échelle atteint "1,40" mètres.

Planche 1 (photo ORSTOM) Conservation de la vivacité des écoulements dans les grands collecteurs du massif. Arrivée et montée d'une crue à la station de contrôle "S₁" du bassin du Zakket (Massif Tamgak, à l'est d'Iférouane)



1. Fin d'écoulement au limnigraphe de la station "S₃", installé sur un enrochement, en rive gauche d'une très importante formation alluviale.



2. Confluence des bassins "S₃", au fond, et "S₄" au premier plan, vue du fort "Massu".

Planche 2 (Photos Le Goulven) Importance des remplissages alluvionnaires sableux dans la partie aval des bassins, à la sortie des massifs. Les pentes latérales fortes et la dégradation des matériaux en surface donnent aux paysages de l'Aïr, ici à Timia, un aspect ruiniforme.



1. Faille d'Ighalabelaben; une des rares voies d'accès au sommet de la vaste structure annulaire des Bagzanes, qui domine par un abrupte de plus de cinq cents mètres, les paysages de socle dégradé du sud de l'Aïr .



2. Pluviomètre totalisateur dans la vallée du Zagado, parmi les quelques ouvertures du massif de l'Aïr sur le désert du Ténéré à l'est.

Planche 3 (Photo ORSTOM) Variété des formes dans l'Aïr; encaissement des talwegs de dégradation primaire à l'intérieur des massifs; larges formations plus évoluées des principales vallées menant aux dépressions périphériques.

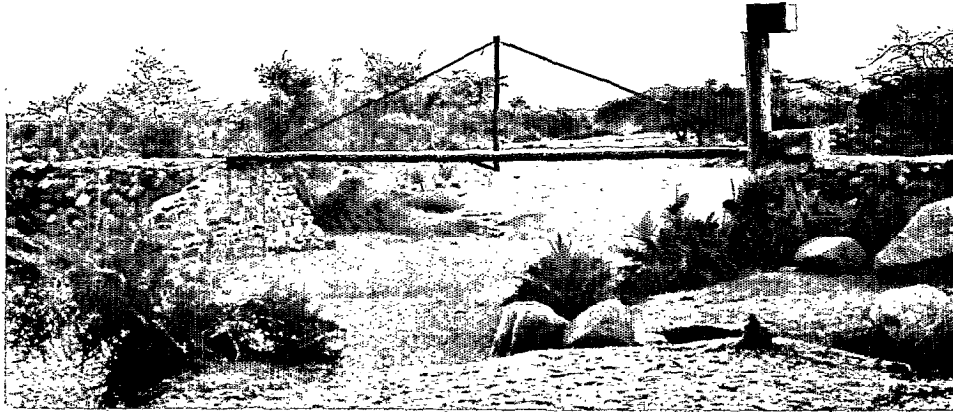


1. Sur le haut bassin versant "1" de Timia. La faiblesse du milieu alluvial est la cause des difficultés d'existence des acacias de berge, lors des sécheresses. Les dépôts argilo-limoneux permettent localement le développement de jardins ou d'une végétation spontanée.

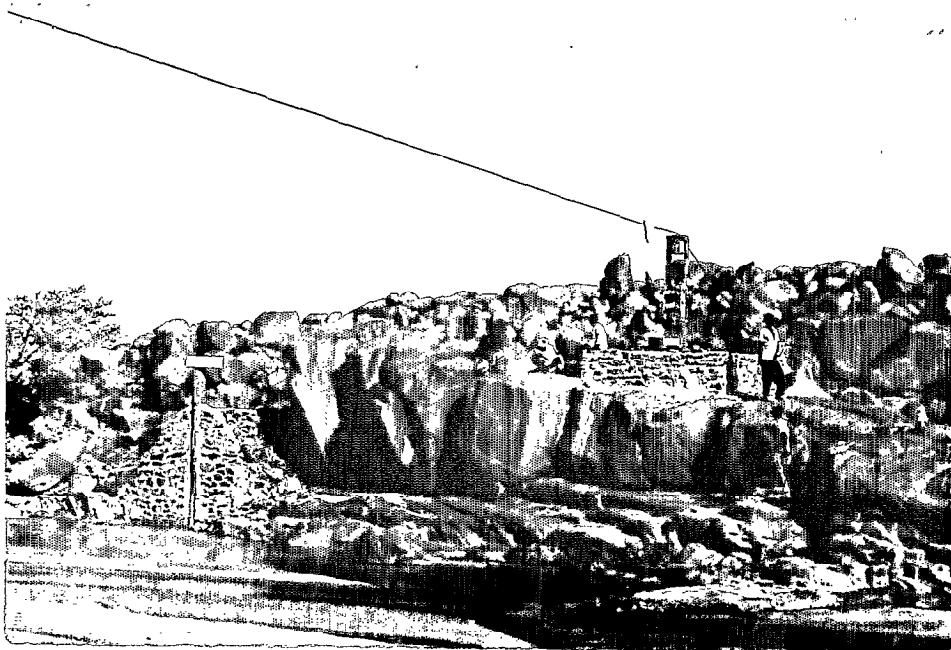


2. Le kori Téloua à proximité de N'Douna. L'importance du milieu alluvionnaire a permis le développement d'une terrasse qui porte une végétation relativement dense d'épineux au-dessus d'une strate de graminées pérennes ou annuelles. Des trous (ers), creusés à même le lit, permettent d'atteindre l'eau de la nappe alluviale toute proche entre les crues, ou en fin d'hivernage. Le lit des koris est aussi utilisé comme voie de pénétration du massif.

Planche 4 (Photos Le Goulven et ORSTOM) Variété des paysages de l'Aïr. L'importance du développement alluvial des vallées détermine celle de la végétation, et sa capacité à supporter les périodes de sécheresse pluriannuelles.



1. Endiguement, passerelle de jaugeage et limnigraphe de la station hydrométrique du bassin d'Agassaghas (5,8 km²)



2. Azel, station hydrologique du bassin du Téloua (1360 km²) à la sortie du massif; protection de la gaine du limnigraphe et plate-forme d'activation du transporteur aérien utilisé pour les prises de vitesse. A remarquer aussi la patine foncée des blocs de granite, et en premier plan, en bas à droite, l'amorce du seuil de contrôle des eaux stabilisant, à grand renfort de gabions, sur plusieurs mètres d'épaisseur, le lit alluvial du kori.

PLanche 5 (photos ORSTOM) L'importance et le caractère torrentiel des crues, en milieu subdésertique d'altitude, nécessitent la protection des matériels et des personnels de mesure, par des ouvrages qui n'apparaissent largement dimensionnés qu'en absence d'écoulement.

RESUME

Hydrologie en milieu subdésertique d'altitude, le cas de l'Aïr (Niger)

Les contraintes du milieu, le caractère irrégulier et aléatoire des événements expliquent que la connaissance des phénomènes hydrologiques de la zone subdésertique soit encore très incomplète. Sa progression ne s'effectue, le plus souvent, qu'au travers d'actions de développement, comme celles menées par l'ORSTOM, durant la période 1974-1990, dans le massif sud-saharien de l'Aïr au Niger. Ce mémoire revêt le double aspect d'une synthèse hydrologique permettant, à partir des méthodes habituelles d'investigation, d'appréhender les phénomènes de ce milieu aux différents stades du cycle hydrologique, et celui d'une recherche géochimique et isotopique, amenant à la précision des mécanismes et origines.

L'aggravation de la sécheresse depuis la fin des années soixante, et ses conséquences tant climatiques qu'hydrologiques sont soulignées. Une étude statistique sectorielle est proposée pour les pluies comme pour les écoulements. Les mesures sur les transports solides en suspension dans le sud du massif permettent d'apprécier la dégradation dont il est encore l'objet, malgré l'affaiblissement des événements hydrométéoriques.

La caractérisation géochimique et isotopique des différents milieux conduit à une meilleure connaissance des milieux et de leur interaction. L'analyse statistique multidimensionnelle des écoulements, à partir des différents traceurs chimiques, montre que les mécanismes relèvent toujours des mêmes processus de dilution en alternance avec des reconcentrations par hydrolyse des silicates plagioclases. Les isotopes stables (Oxygène-18, Deutérium) sont, dans ce milieu à fortes contraintes climatiques, les seuls traceurs utilisables pour la décomposition de l'hydrogramme de crue. La nappe alluviale, malgré sa capacité limitée, participe de façon très significative aux écoulements.

Mots Clés : Hydrologie, milieu subdésertique, sécheresse, transports en suspension, géochimie isotopique, décomposition de l'hydrogramme.

ABSTRACT

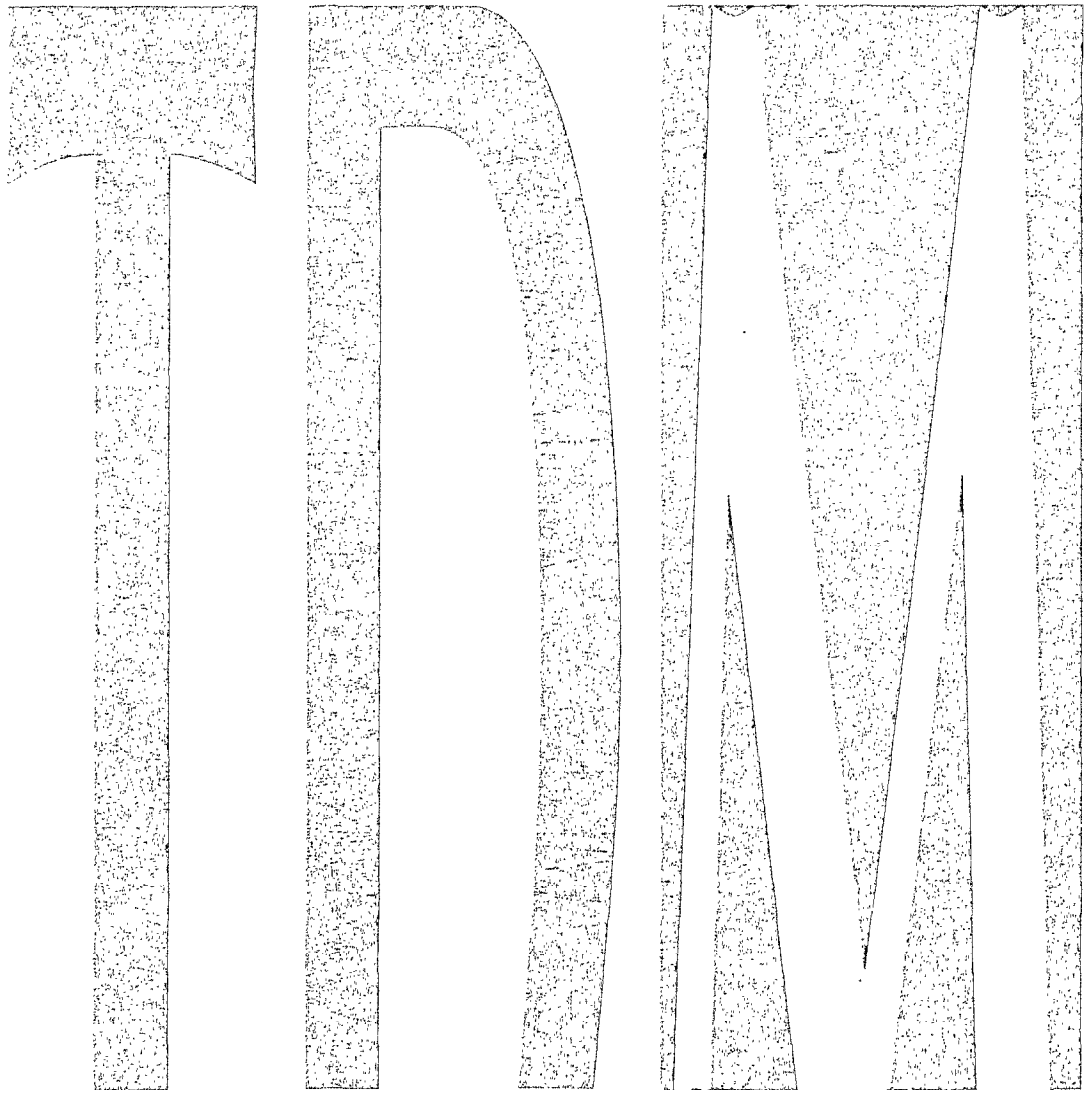
Hydrology in altitude subdesertic environment: case of Aïr (Niger)

The constraints of the environment, the character irregular and random of the events may explain that the knowledge of the hydrological phenomena occurring in the subdesertic zone is up to now still largely incomplete. Improvements in this knowledge are performed, most often through development actions, such as those that are conducted in the frame of the activities of the French Research Institute (ORSTOM), for instance during the period 1974-1990 in the sub-saharian Aïr massif, in Niger. This dissertation presents the dual interest of (1) an hydrological synthesis that enables, from classical investigation methods, to address phenomena of this environment, at various stages of the hydrological cycle, and of (2) a geochemical and isotopic research, that leads to precise the mechanisms and origines.

The worsening of the drought since the end of the sixties and its consequences from both climatic and hydrological point of view are underlined. A sector-related statistical analysis is proposed for the rainfall and for the runoffs. The carriage measurement of solid suspended material in the South of the massif enables to evaluate the damage to which it is still submitted, despite the weakening of the hydrometeorological events.

The geochemical and isotopic characterization of the various environments enables to improve our knowledge of the environments and of their interaction. The multivariate statistical analysis of runoffs, through the various chemical tracers indicates that the mechanisms always proceed from the same dilution processus alternately with reconcentrations by hydrolysis of silicate plagioclases. The stable isotopes (Oxygen-18, Deuterium) alone are, in this environment that is marked by strong climatic constraints, usable for the decomposition of the discharge hydrograms. Despite its limited capacity, the alluvial water table significantly contributes to the runoff flows.

Key words : Hydrology, Subdesertic environment, Drought, Suspension Carriage, Isotopic geochemistry, Decomposition of the Hydrogram.



Thèses et documents microfichés

1983-1984

Hydrologie, Milieu subdésertique, Sécheresse, Transports en suspension,
Géochimie isotopique, Décomposition de l'hydrogramme



209-213, rue La Fayette
75480 Paris cedex 10

ISSN : 0767-922X
ISBN : 2-7099-1343-7

Diffusion :
32, avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex