

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

**FORMATION DOCTORALE
SCIENCES DE L'EAU ET AMENAGEMENT**

MEMOIRE

présenté à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le Diplôme d'Etudes Approfondies en
Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental

**MODÉLISATIONS HYDRAULIQUE ET HYDROLOGIQUE
D'UN RÉSEAU DE CAPTAGE DANS LA
CORDILLÈRE DES ANDES:
LA VALLÉE DE TOCONCE (2^{ème} Région du Chili)**

par

Alex COVARRUBIAS

Soutenu le 27 Septembre 1996 devant le Jury composé de :

MM.	C.	BOCQUILLON, Président
	P.	CHEVALLIER, Directeur de stage
	M.	DESBORDES, Examineur
	F.	MONIOD, Examineur



REMERCIEMENTS / AGRADECIMIENTOS

Avant que le lecteur n'aborde la partie technique de ce mémoire, je ne peux faillir à la tradition du DEA de dire quelques mots de remerciements à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont permis la réalisation de ce travail. Comme ma maîtrise de la langue française n'est pas suffisante pour exprimer fidèlement ma pensée, je demande d'avance des excuses au lecteur pour avoir écrit ces remerciements en espagnol, ma langue natale.

Mis primeros agradecimientos van hacia mi amigo Pierre Pourrut, investigador del ORSTOM establecido en Antofagasta, Chile, gestor este DEA. Su impulso, su apoyo, su ayuda y aliento incondicional, son inconmensurables y vayan estas pocas palabras de reconocimiento para él.

A continuación debo agradecer muy especialmente a Pierre Chevallier, quien a pesar de su muy cargado calendario de actividades como jefe de la Unidad de Investigación 21 del ORSTOM, tomó bajo su responsabilidad mi estadía y desarrollo del DEA, culminando con su muy valiosa guía de este trabajo.

A Monsieur le Professeur Claude Bocquillon, por haber aceptado mi inscripción en el DEA y luego ser integrante de la Comisión de Examen.

Igualmente debo agradecer a los señores Frédéric Moniod y Pierre Chevallier por haber aceptado formar parte de la Comisión Examinadora.

A Marc Morell, Director del Laboratorio de Hidrología en Montpellier, y en su nombre a todas las personas que conforman dicho laboratorio: investigadores, técnicos, secretarías, administrativos, quienes me acogieron como un integrante más y en todo momento me alentaron y ayudaron para seguir adelante, reconociendo los problemas de ambientación que tiene un sudamericano a un mundo totalmente diferente. Especial mención debo hacer a mi nuevo amigo Alain Laraque, por su fundamental e incondicional apoyo.

A ORSTOM y ECOS, que con sus becas, posibilitaron mi estadía en Francia. A mi unidad de origen, la Universidad Católica del Norte, que aportó los medios para los viajes entre Chile y Francia.

A mis compañeros de curso, franceses y extranjeros, quienes siempre me acogieron con especial afecto, no obstante la diferencia generacional. Especial mención debo hacer a dos de ellos, con quienes seguramente por la afinidad del idioma, más nos avenimos: Olga Padilla y Manuel Arreola, de España y México respectivamente. El aliento permanente, la ayuda desinteresada y el apoyo incondicional fue nuestro slogan. Gracias también a ellos.

En párrafo aparte debo hacer un agradecimiento muy especial a Isabelle Chaffaut y Pascal Kosuth, tesista de doctorado en ORSTOM y director de investigaciones en CEMAGREF respectivamente, cuyo apoyo y permanente preocupación fueron fundamentales durante mi residencia en este país.

Mis últimos agradecimientos pero los más importantes son para mi familia, mi esposa y mis 3 hijos, a quienes he debido dejar solos por el tiempo que ha durado mi estadía en Francia. Ellos, y muy especialmente mi esposa, con su sacrificio y espíritu de lucha frente a este nuevo desafío en sus vidas me dieron el ejemplo a seguir, sin claudicar. Su aliento permanente fueron la luz indispensable para poder seguir el camino hasta el final.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
Première Partie	
LES ELEMENTS UTILISES. LA ZONE D'ÉTUDE ET LE LOGICIEL VENSIM®	
A - DESCRIPTION DE LA ZONE ÉTUDIÉE	
A.1.- Le contexte régional	
A.1.1.- Généralités	4
A.1.2.- Géologie et morphotectonique	5
A.1.3.- Climatologie	6
A.1.4.- Hydrologie	7
A.2.- Le contexte local	
A.2.1.- Caractérisation générale du bassin	10
A.2.2.- Les ouvrages hydrauliques et les captages dans le bassin	17
A.2.3.- Fonctionnement opérationnel du système	25
B - LE LOGICIEL VENSIM®	
B.1.- Généralités	29
B.2.- Les outils du VENSIM®	29
B.2.1.- Construction et représentation graphique du modèle	29
B.2.2.- La simulation	30
B.2.3.- L'analyse et interprétation des résultats	30
Deuxième Partie	
LA MODELISATION DU BASSIN VERSANT TOCONCE. ANALYSE DES RESULTATS	
C - LA MODELISATION	
C.1.- Considérations générales préalables	32
C.2.- La base de données utilisée	32
C.3.- Les hypothèses hydrauliques et les bases de calcul	33
C.4.- Les hypothèses hydrologiques	34
C.5.- Le schéma du modèle et les valeurs d'entrée	36
D - LES RESULTATS	
D.1.- Introduction	41
D.2.- Les problèmes de calage et validation	41
D.3.- La simulation	49
D.4.- Perspectives	50
CONCLUSION	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	58
ANNEXE	61

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La 11^{ème} Région du Chili se situe dans l'un des déserts les plus arides du monde : le Désert d'Atacama. Elle est cependant très riche en ressources minérales et a fait l'objet depuis le siècle dernier d'une attraction spectaculaire pour des populations en quête d'enrichissement dans l'exploitation du sol. Mais l'homme ne peut pas survivre sans eau et l'augmentation sans trêve des populations de migrants a eu pour conséquence immédiate une demande toujours croissante de cet élément vital. Parallèlement, les entreprises qui se sont installées pour une extraction industrielle des ressources minières ont aussi besoin de grandes quantités d'eau pour les diverses étapes de leur exploitation.

Dans un passé plus ancien, antérieur à la colonisation d'abord des Incas, puis des Espagnols, le peuple atacaménien avait établi de petites installations à proximité des rares sources d'eau disponibles, essentiellement entre 2 500 et 4 000 m d'altitude ; ces villages constituaient des étapes pour les voyageurs. L'agriculture sommaire qui s'y pratiquait s'est maintenue jusqu'à aujourd'hui.

La demande toujours croissante et conflictuelle de ressource en eau s'est accélérée dans les dernières années à cause de la forte augmentation du nombre d'exploitations minières dans la région. Cela a conduit à réaliser nombreux études hydrologiques et hydrauliques dans la région avec comme objectif fondamental l'évaluation de la ressource hydrique en vue de l'exploitation des différentes zones de production (parmi les principales études : Corfo, 1973 ; CODELCO, 1977 ; IFARLE, 1982 ; INYGE, 1991). Cette ressource en eau provient essentiellement des précipitations plus abondantes sur la haute cordillère : l'isohyète interannuelle 50 mm se trouve approximativement entre 3 500 et 4 000 m d'altitude. Elle est aujourd'hui largement captée dans un réseau de conduites qui sillonnent les vallées et les plaines minérales du désert.

Très peu de ces études se placent dans une perspective régionale et encore plus rares sont celles qui se placent dans un contexte historique tenant compte de l'évolution d'une ressource dont l'offre est de plus en plus réduite face à la demande. Le projet CHI-69/535 du Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD) est une exception ; mais il date de 1978, c'est-à-dire il y a déjà presque 20 ans.

Dans cette optique, l'objectif de ce mémoire est d'établir un outil méthodologique sur une base informatique simple permettant de formuler des scénarios d'utilisation de la ressource disponible à fin d'optimiser son exploitation de la manière la mieux adaptée aux contingences de la relation offre-demande. Le résultat hydrologique doit nécessairement être rendu compatible avec d'autres critères de type économique, politique, agricole, environnemental et même culturel, pour trouver la meilleure solution pour la région.

La méthode a été développée dans le contexte d'un petit bassin versant de l'Altiplano de la Cordillère chilienne (la *Puna*), équipé de divers ouvrages hydrauliques de captage et de quelques stations de mesures hydrologiques (pluviomètres, limnimètres et limnigraphe, station météorologique) qui facilitent la réalisation de modélisations. Cette application n'est bien sûr qu'une première approche, mais elle peut constituer la base d'une généralisation à toute la région.

Le modèle proposé est composé de deux parties : l'une relative à la structure hydraulique et l'autre à la composante hydrologique. Naturellement, c'est cette dernière qui définit les conditions initiales et aux limites du système modélisé et sa complexité engendre différentes alternatives pour les entrées du système hydraulique d'un bassin versant dont la structure est, par définition, particulièrement rigide. Il s'agit donc d'analyser les réponses d'un ensemble système hydraulique / système hydrologique pour trouver la meilleure solution d'exploitation devant un type de situation donné. C'est ce que nous avons essayé de développer dans ce mémoire avec de nombreuses simplifications dont la première et non la moindre est de n'avoir travaillé qu'avec un pas de temps journalier.

Le rapport est organisé en deux parties. La première situe le contexte de l'étude : d'une part, une description de la zone d'étude avec une approche géographique, géologique et hydroclimatologique ; d'autre part, une présentation de l'outil informatique qui a servi à la construction du modèle, le logiciel VENSIM[®]. La deuxième partie présente la modélisation avec une présentation des hypothèses de base, de la construction du modèle, des résultats obtenus et des conclusions. Des annexes détaillent les enregistrements de données utilisées et quelques résultats des simulations réalisées.

1ère Partie

LES ELEMENTS UTILISES

LA ZONE D'ÉTUDE ET LE LOGICIEL VENSIM[®]

A - DESCRIPTION DE LA ZONE ETUDIÉE

A.1.- Le contexte régional

A.1.1.- Généralités

La zone étudiée est située au nord du Chili, dans la II^{ème} Région administrative qui couvre une superficie voisine de 125 000 km², soit un peu plus de 16,5% de la surface du pays (partie antarctique exclue), entre 21° et 26° de latitude sud, et entre 67° et 70° 30' de longitude est. Elle se trouve au coeur du désert d'Atacama, connu pour être l'un des plus absolus de la planète.

Cette zone est riche en ressources minérales, parmi lesquelles le cuivre — on y trouve la mine à ciel ouvert la plus grande du monde, dont la production est d'environ 800 000 tonnes de cuivre raffiné par an —, les nitrates, le salpêtre et le lithium. Les ressources de la mer et la pêche ont un potentiel élevé mais ne sont que peu développées à une échelle industrielle, contrairement au cas de la I^{ère} Région au nord.

La population de la Région, qui compte environ 400 000 habitants soit moins de 4% de celle du pays, est essentiellement citadine et concentrée dans les villes d'Antofagasta et de Calama et, dans une moindre mesure, à Tocopilla et à Taltal. La population rurale, plus ancienne mais dont l'existence est directement liée à la présence d'eau et de terres de bonne qualité, est clairsemée et ne représente guère plus de 1% de la population régionale. L'éthnie atacaménienne, qui la compose en majorité, constitue pourtant la population traditionnelle, héritage d'un peuplement qui remonte à environ 10 000 ans av. J.C.

Dans la zone particulière qui fait l'objet de cette étude, et grâce à la pérennité des écoulements en provenance de la cordillère, l'occupation du territoire est très ancienne. C'est ainsi qu'à la confluence des rivières Hojalar et Toconce, et, plus bas, à celle des rivières Toconce et Salado, on retrouve la trace d'installations humaines semi-permanentes remontant à près de 7 000 ans av. J.C. Le village de Toconce, qui reste l'une des oasis les plus caractéristiques de la culture atacaménienne, montre certains ouvrages hydro-agricoles de conservation ou de distribution de l'eau d'irrigation qui témoignent encore du génie des populations sédentaires qui y sont installées depuis 300 av. J.C.

La végétation, en général inexistante ou très pauvre à cause de la grande sécheresse, n'est présente qu'au-dessus de 2 500 m d'altitude ou autour des points d'eau permanents. Elle varie en fonction de l'augmentation des pluviosités annuelles avec l'altitude (malgré la grande irrégularité des pluviométries) et disparaît au-delà de 4 000 m. Il s'agit de toute façon d'une végétation adaptée aux conditions extrêmes qui règnent dans le désert (températures élevées en été et très basses en hiver, amplitudes journalières pouvant atteindre 30°C, sols minéraux et salés, humidité très faible) ; elle est composée de cactacées, d'arbrisseaux aplatis, et de graminées xérophytes type «*llareta*» ou «*queñoa*».

L'aridité extrême qui caractérise cette région est conditionnée par deux variables géographiques principales, d'une part les conditions climatiques résultant de la circulation atmosphérique générale, d'autre part le contexte géologique caractérisé par une tectonique cassante et un volcanisme généralisé. Ces deux éléments sont analysés de manière plus détaillée ci-après.

A.1.2.- Géologie et morphotectonique

La physiographie et la géologie régionales sont en grande partie la résultante de la convergence dynamique de la plaque océanique Nazca et du continent sudaméricain. Elle est responsable de la forte activité sismique et du volcanisme actif de la région (volcan Lascar, champ géothermique du Tatio). Elle est également traduite par un ensemble de structures faillées d'orientation méridienne qui définissent différents blocs soulevés (horsts) et des fossés d'effondrement (grabens).

C'est ainsi que, d'est en ouest, la II^{ème} Région peut être divisée en cinq unités morpho-structurales bien identifiées : la Cordillère de la Côte, la *pampa* ou Dépression Centrale, la Cordillère Centrale (subdivisée en Pré-Cordillère et en Cordillère de Domeyko), les Bassins Intermontagneux et enfin la Cordillère Principale ou Cordillère des Andes qui inclut une partie de *puna* (altiplano chilien). Ces unités témoignent du nombre et de l'intensité des mouvements tectoniques et des cycles volcaniques dont les paroxysmes remontent au Tertiaire moyen.

La Cordillère de la Côte, constituée par des roches appartenant au socle paléozoïque et mésozoïque sur lesquelles se sont déposées des couches de sédiments continentaux tertiaires et quaternaires, forme un cordon montagneux dont la largeur peut atteindre 55 km et dont l'altitude varie de 1 000 à 3 000 m. En général très proche de l'océan, elle prend l'allure d'une grande falaise escarpée qui ne laisse guère de place au développement d'une plaine côtière, mis à part les sites où sont installées les agglomérations. Il peut aussi exister localement de grandes terrasses océaniques, telles celles qui s'étendent entre Mejillones et Antofagasta, dont l'altitude peut dépasser 200 m. Le rôle de la cordillère côtière est double : d'une part, elle isole l'intérieur des terres des influences océaniques, contribuant ainsi à leur aridité ; d'autre part, elle a servi de barrière aux eaux et aux sédiments provenant du secteur oriental.

Comprise entre la Cordillère de la Côte et la Cordillère de Domeyko, la *pampa* centrale se présente comme une dépression inclinée dans le sens N-O, entre 2 500 et 600 m d'altitude environ. C'est un plateau irrégulier de 40 à 50 km de large en moyenne, d'orientation nord-sud, sur lequel se situent quelques petits *salares* (lacs et étendues salés, fenêtres d'évaporation des eaux souterraines, dont l'origine est encore l'objet de discussions) et des mines d'où l'on extrait nitrates et salpêtre. Cette unité correspond à un ancien géosynclinal envahi par l'océan, effondré en bloc entre les structures qui définissent les cordillères qui l'entourent, et qui a été le siège d'un remplissage cénozoïque se traduisant par de puissantes accumulations de sédiments, d'ordre hectométrique pouvant localement dépasser 1 000 m d'épaisseur.

La Cordillère Centrale se présente sous la forme de deux systèmes séparés. Au nord, la Pré-Cordillère est limitée au secteur du bassin hydrographique de la Loa supérieure et son altitude moyenne est de l'ordre de 4 000 m. Au sud, la Cordillère de Domeyko ne dépasse guère 3 000 m, mais son extension géographique est plus importante. La Cordillère Centrale résulte du soulèvement du socle paléozoïque et constitue une barrière imperméable empêchant les communications et la circulation des eaux superficielles ou souterraines entre l'est et l'ouest. Ainsi s'explique l'endoréisme généralisé de la région et le fait que les rivières côtières, très courtes, ne soient pas alimentées par les précipitations de la cordillère andine. Le seul système hydrographique exoréique est celui de la rivière Loa, qui se glisse vers l'ouest à la latitude de la ville de Calama.

La zone des *Bassins Intramontagneux* correspond à une dépression longitudinale qui s'étend entre les Cordillères Centrale et Andine. On y trouve les deux plus grands bassins

hydrographiques de la région (le système endoréique du Salar d'Atacama et le bassin de la Loa supérieure), ainsi que les plus grands *salares*, celui d'Atacama bien entendu, mais aussi ceux de Punta Negra, Ascotán et Carcote.

A l'est, la Cordillère Principale (appelée aussi Orientale) ou Cordillère des Andes, présente dans la zone étudiée deux unités morpho-géologiques distinctes : le massif andin au sens strict et la *puna*. La chaîne andine, née d'un bloc soulevé d'origine tectonique, a été le siège d'un volcanisme tertiaire généralisé traduit par d'innombrables coulées de laves et des cônes volcaniques dont l'altitude dépassent souvent 5 500 m. A la fin du Tertiaire, tout spécialement au Miocène, mais également au Pliocène et au Pléistocène, le volcanisme est devenu localement ou sporadiquement plus explosif, circonstance dont témoignent les épaisseurs extrêmement importantes de débris pyroclastiques disséminés sur de grandes surfaces : l'interstratification de coulées de type effusif et de tufs volcaniques (cendres, poussières et lapillis plus ou moins consolidés) a donné des formations dites *ignimbritiques*. Ces ignimbrites sont par essence très hétérogènes et leurs composants présentent divers stades d'acidité, le plus souvent andésitiques, rhyolitiques et dacitiques (ces deux derniers types d'ignimbrites sont celles observées sur le bassin du Toconce). Elles composent l'unité altiplanique chilienne, la *puna*, vaste étendue dont l'altitude s'établit autour de 4 000 à 4 300 m. C'est là que naît la grande majorité des cours d'eau de la région.

A.1.3.- Climatologie

Trois facteurs géographiques ont une influence prépondérante sur le climat régional:

- l'anticyclone du Pacifique Sud, dont la présence pratiquement permanente se traduit par de hautes pressions barométriques, un climat stable et des ciels dégagés ;
- le courant froid de Humboldt, qui provient de l'Antarctique et dont la proximité provoque une anomalie négative de l'évaporation observée au dessus de l'océan; celle-ci est bien inférieure aux valeurs théoriques correspondant à la latitude. Par conséquent, les masses d'air océanique sont froides, faiblement chargées en vapeur d'eau, et elles ne trouvent donc pas les conditions thermodynamiques requises pour précipiter quand elles arrivent sur le continent ;
- la Cordillère des Andes, dont les sommets élevés font obstacle à la pénétration des masses d'air humide en provenance du centre de basses pressions continentales situé sur le bassin amazonien.

Un climat de type désertique règne donc presque partout, même s'il est parfois légèrement modifié par les influences qu'exercent localement l'océan et le relief. Selon les critères définis par Köppen et adaptés à la réalité chilienne par Fuenzalida (1950), on peut distinguer 5 grands types de climats formant des bandes d'orientation méridienne. On peut successivement identifier, d'ouest en est :

- un climat *désertique avec des nuages abondants* (Bwn) : présent dans la frange côtière, il se caractérise par une assez forte humidité relative engendrée par les vents provenant de l'Océan Pacifique; l'influence océanique se traduit aussi par des amplitudes thermiques journalières et saisonnières modérées ; quant à la pluviosité, seulement provoquée par la condensation très minime de brouillards qui peuvent s'étendre vers l'intérieur sur près de 50 km, elle est voisine de zéro;
- un climat *désertique normal* (BW) : présent dans l'unité géographique appelée *dépression intermédiaire*, c'est le climat le plus fréquent de la région ; on y observe une prédominance de ciels dégagés et une faible humidité relative, ce qui entraîne des amplitudes thermiques

journalières et saisonnières très élevées, souvent proches de 35°C ; les précipitations sont toujours presque nulles et d'une grande irrégularité avec, exceptionnellement, quelques averses torrentielles de courte durée ;

- un climat *désertique marginal d'altitude* (BWH) : présent dans une frange d'altitude comprise entre 3 000 et 4 000 m, la pluviométrie y est relativement plus élevée même si elle reste très faible ; les températures moyennes diminuent, mais on observe toujours de fortes amplitudes thermiques journalières et saisonnières ;
- un climat *de steppe d'altitude* (BSH) : présent dans les zones d'altitude élevée, les précipitations atteignent des valeurs plus fortes et sont concentrées dans les mois d'été (décembre à mars) ;
- un climat *de toundra d'altitude* (ETH) : il est circonscrit au secteur le plus oriental de la région, appelé *Puna de Atacama* ; plus qu'un climat classique de toundra, il s'agit en fait d'un climat désertique modifié par l'altitude ; la pluviosité y est plus forte, quoique toujours aussi irrégulière, et les températures sont généralement basses, avec des valeurs pouvant descendre au-dessous de -20°C au cours de l'hiver austral.

Cette classification est présentée à la figure 1.

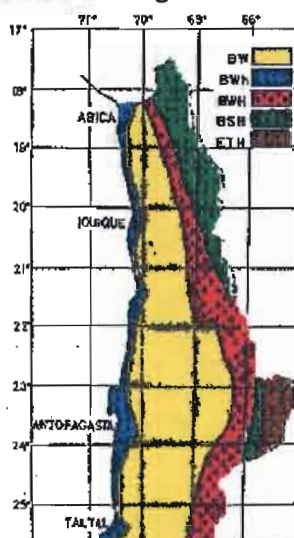


Fig. 1 : Carte climatique du nord du Chili.

Il faut aussi signaler la présence de quelques zones où, grâce à la protection du relief et à l'exposition favorable des versants, règnent certains microclimats qui ont donné lieu à l'installation de communautés traditionnelles d'agriculteurs, principalement les Atacaméniens.

A.1.4.- Hydrologie

Les caractéristiques hydrologiques de la région dépendent étroitement des conditions climatiques, elles-mêmes liées aux facteurs géographiques ou strictement orographiques.

C'est ainsi que la Cordillère de la Côte, du côté occidental, et celle des Andes, du côté oriental, jouent un rôle déterminant pour éviter la pénétration des masses d'air chargées d'humidité en provenance de la mer et du bassin amazonien. Les précipitations, limitées au secteur oriental, ne peuvent jamais atteindre des valeurs très élevées puisqu'elles proviennent de masses d'air amazonien, déjà en grande partie déchargées d'humidité par adiabatisation lors de leur ascension le long du versant est. Les cours d'eau permanents y sont donc rares.

Dans la région centrale, la Cordillère de Domeyko n'apporte aucune modification sensible à l'établissement des régimes hydrologiques et aux conditions générales du réseau hydrographique qui sont la règle sur toute la région. L'endoréisme et l'aréisme constituent les principales caractéristiques, mis à part le seul système exoréique, celui de la rivière Loa.

C'est donc uniquement dans les zones les plus orientales, au-dessus de 2 500 m, là où les précipitations sont appréciables, que les écoulements deviennent relativement importants. La figure 2 présente la relation qui existe entre les précipitations et l'altitude, établie pour le bassin du rio Salado où se trouve la zone étudiée. Cette relation a été réalisée avec une chronique des pluviométries plus étendue que celle prise en compte dans le cadre de l'étude présente, ce qui ne fait d'ailleurs qu'augmenter la confiance qu'on peut attribuer à l'ajustement de la droite. Les points les plus élevés correspondent aux stations pluviométriques du bassin du Toconce.

Les précipitations moyennes annuelles varient de 5 à 300 mm, à l'exception de quelques périodes exceptionnelles qui rendent compte de la grande irrégularité pluviométrique. C'est le cas des années 1975, 1977, 1984 et 1987. L'année 1977 est sans doute de fréquence rare, le mois de février ayant donné lieu à des épisodes pluvieux étalés sur plus de 10 jours avec des totaux exceptionnels, par exemple 239 mm à Toconce et 223 mm à Linzor.

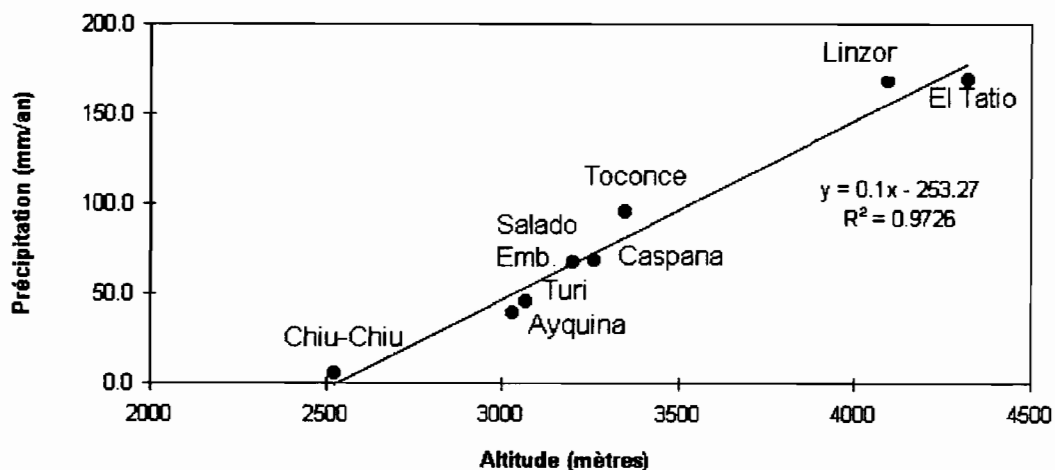


Fig. 2 : Relation entre la précipitation interannuelle (1975-1995) et l'altitude.

Les études menées jusqu'à présent ont cependant montré que, sauf lors des rares crues enregistrées, les écoulements permanents observés ne sont pas en relation directe avec les pluviométries. Il est en effet pratiquement impossible d'équilibrer les termes de l'équation du bilan hydrologique. Les résultats montrent en général une lame écoulee annuelle très peu variable dans le temps et indépendante des précipitations sur le bassin. Ceci démontre la très forte contribution des eaux souterraines aux flux observés dans le réseau de drainage superficiel. L'origine de ces eaux est probablement éloignée dans le temps (décades ?, siècles?) comme semblent le mettre en évidence les diverses études isotopiques menées dernièrement dans la région (Messerli *et al.*, 1993 ; Aravena, 1995 ; travaux UCN/ORSTOM 1993-96). D'autres recherches récentes montrent aussi la présence de formations détritiques, conglomérats et grès, intercalées entre les flux ignimbricitiques (Calderón, 1994 ; González, 1995), ce qui indique l'action de processus d'érosion hydrique développés sous des climats plus pluvieux ; cet élément vient d'ailleurs confirmer l'hypothèse de l'existence de conditions climatiques plus humides à une époque relativement récente (Messerli *et al.*, 1993 ; Grosjean

& Núñez, 1994). De grands réservoirs souterrains auraient ainsi été constitués, puis rechargés et probablement associés à des réseaux de fractures transversales d'orientation est-ouest ; ils contribueraient encore de nos jours à l'alimentation des systèmes hydrographiques superficiels (hypothèse suggérée par Pourmut *et al.*, 1994 et 1995).

A.2.- Le contexte local

A.2.1.- Caractérisation générale du bassin

Il convient de revenir sur certains aspects du contexte régional déjà abordés ci-dessus afin de mieux comprendre le cadre hydrologique général. Près de 90% des ressources en eau de la II^{ème} Région d'Antofagasta sont originaires des deux grands bassins hydrographiques du Salar d'Atacama et de la rivière Loa, cette dernière en fournissant 70%. Longue de 420 km, la rivière Loa draine un bassin de 33 000 km² qui constitue le seul exemple d'exorésisme de la région. Ses affluents principaux sont les rivières San Pedro de Inacaliri et Salado (80% du total des eaux de Loa) et, dans une moindre mesure, la rivière San Salvador (voir Fig. 3).

Le bassin étudié, celui du rio Toconce, appartient au bassin du rio Salado, exemple typique des rivières qui naissent de la chaîne volcanique andine et dont le réseau d'affluents est bien développé en altitude, au-dessus de 3 000 mètres. A sa confluence avec le Salado, le rio Toconce draine 368 km², soit environ la moitié de l'ensemble apportant avec des écoulements permanents du bassin et, en terme de débit, les extractions qui y sont faites par des prises hydrauliques constituent à peu près 65% du total des leurs eaux exploitées.

La seule station hydrométrique d'exploitation continue existant sur le rio Toconce est située 8,5 km à l'amont de sa confluence avec le Salado, et elle ne contrôle que 174 km², un peu moins de la moitié (47,3%) de la surface totale de son bassin (voir Fig. 4). Il faut y ajouter les 12,7 km² qui correspondent à la tête du bassin de la rivière Hojalar, à partir de laquelle est réalisé un transfert artificiel. Cette dernière rivière, qui est le principal affluent du rio Toconce, ne conflue qu'à l'aval de la station hydrométrique, à quelques kilomètres à l'amont de la confluence Toconce-Salado ; elle n'intervient donc pas dans les bilans de la présente étude.

La rivière Toconce trouve son origine dans les diverses sources de la face occidentale du volcan Linzor. Son réseau, d'abord diffus, reçoit, quelques kilomètres après s'être concentré dans une *quebrada* (ravine), le ruisseau Linzor qui est le premier affluent naturel en provenance des *Ojos de Linzor* (haut-piémont du même volcan Linzor). Plus à l'aval, au lieu-dit *sous-système Linzor*, s'y unissent (elle est alors captée sous conduite en fonte) les apports non négligeable d'eaux souterraines qui surgissent en tête d'une coulée dacitique. C'est là que sont effectués les premiers prélèvements destinés, pour partie à la distribution d'eau potable aux villes du désert (ESSAN), et pour partie à l'exploitation minière (CODELCO). Environ 4 kilomètres à l'aval, la rivière Linzor formée par les pertes des captages cités ci-dessus, renforcées par des venues souterraines et par le débit d'un affluent de rive droite, reçoit en rive gauche les eaux de *Piedras Grandes* qui proviennent (après un trajet en conduite forcée) des têtes du haut-bassin limitrophe de la rivière Hojalar. Avant les divers prélèvements du *Système Toconce*, qui mettront le lit à sec, elle reçoit un petit affluent provenant du piémont du volcan du même nom, ce qui constitue le dernier apport d'importance. Elle récupère progressivement vers l'aval un débit appréciable (quelques dizaines de litres par seconde), grâce aux affleurements d'eaux souterraines, avant de recevoir le rio Hojalar et de s'unir au rio Salado.

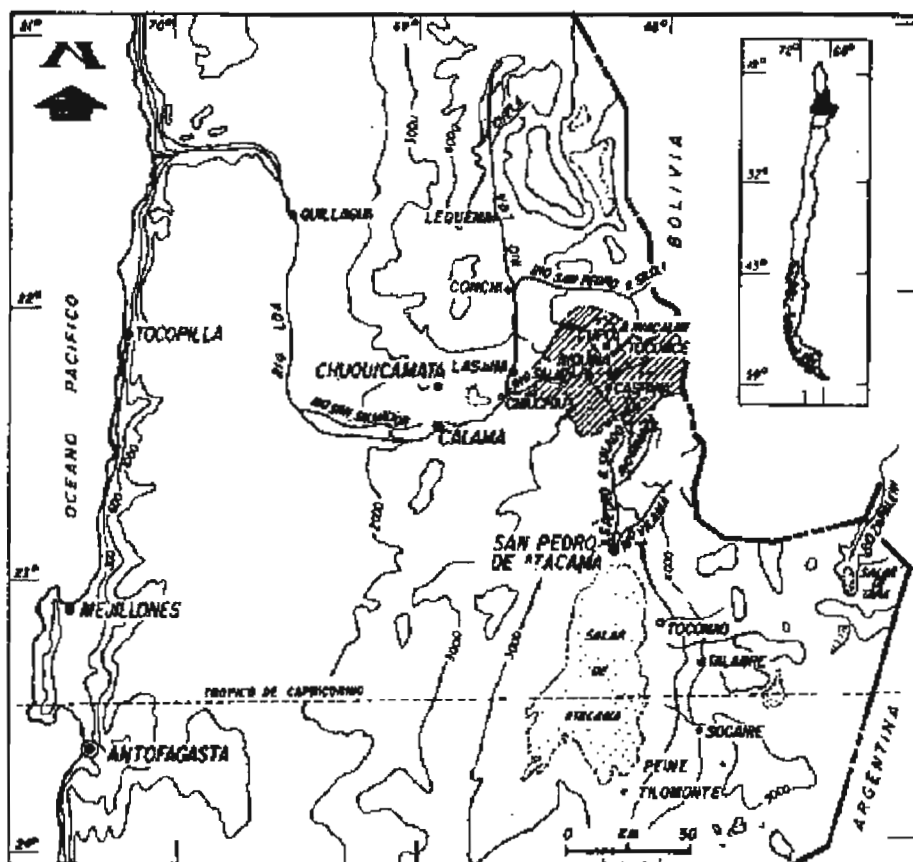


Fig. 3 : Carte de situation du bassin versant de la rivière Salado à l'II^{ème} Région du Chili.

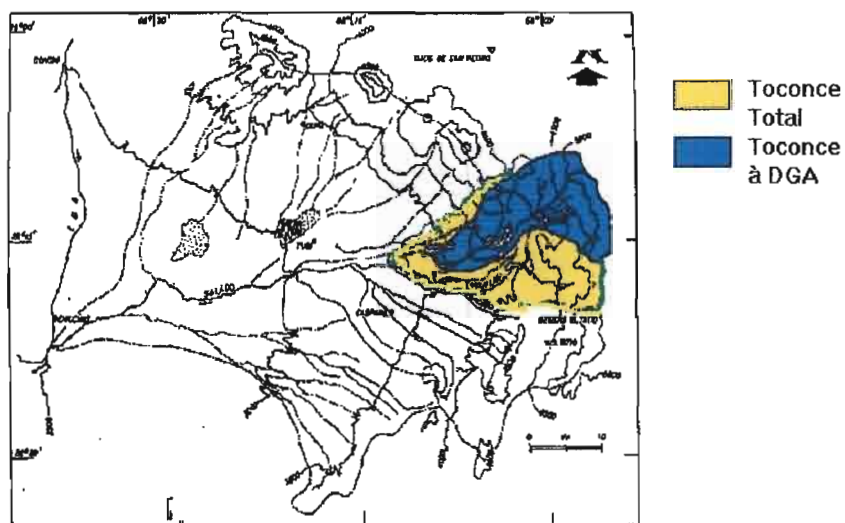


Fig. 4 : Carte des bassins versants Salado et Toconce, II^{ème} Région du Chili.

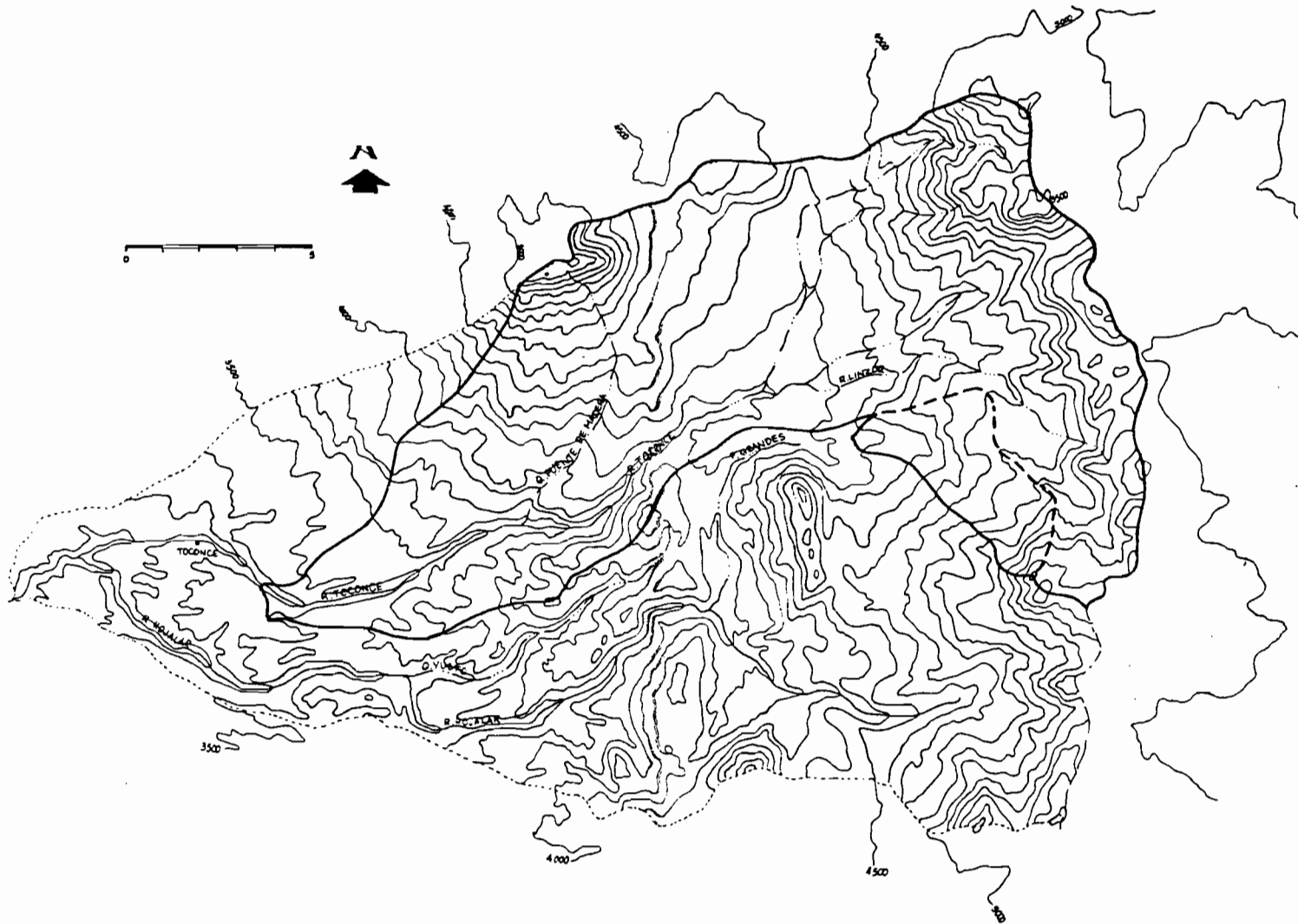


Fig. 5 : Bassin Toconce et superficie controlée.

On trouvera ci-dessous quelques valeurs concernant les caractéristiques physiques et géographiques du bassin :

- réseau hydrographique :
 - longueur du cours principal (Toconce) = 17,5 km
 - longueur de l'affluent principal (Linzor) = 11,0 km
 - longueur totale des affluents principaux = 66,5 km
- relief : la courbe hypsométrique et le profil longitudinal sont données ci-après (fig. 6 et 7)

altitudes : maximale	= 5 606 m
minimale	= 3 334 m
coefficient de compacité de Gravelius	= 1,59
rectangle équivalent : L	= 32,1 km
l	= 5,4 km
indice de pente	= 0,071

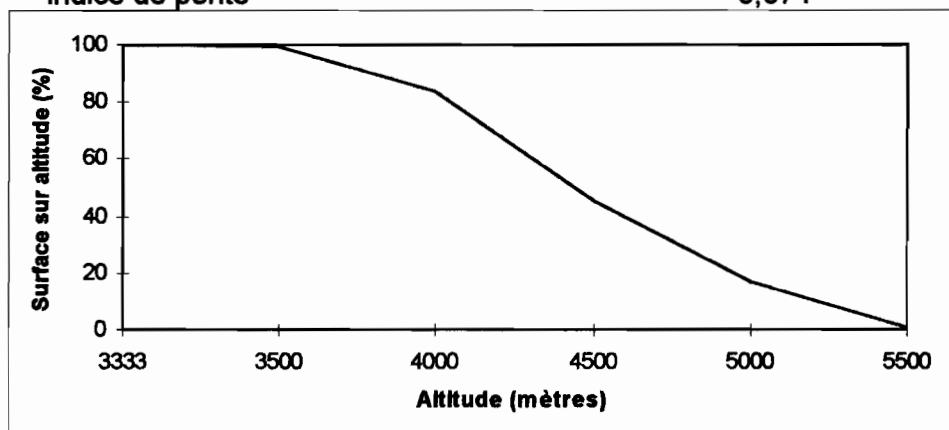


Figure 6 : courbe hypsométrique du bassin de Toconce

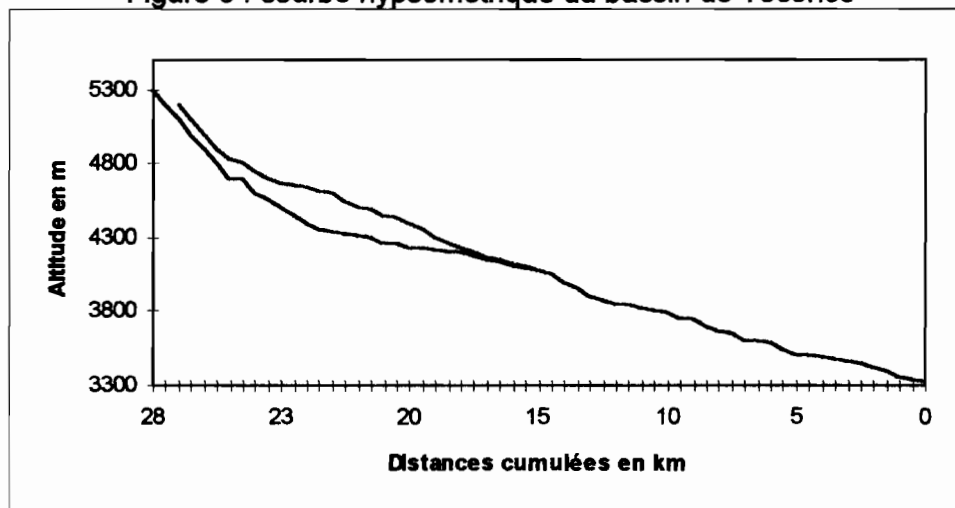


Fig. 7 : Profils en long des rivières Toconce et Linzor

- Climat : le climat désertique marginal d'altitude (BWH) est le plus largement répandu sur le bassin versant étudié, mais certaines zones, limitées dans leur extension, sont occupées par les climats de steppe (BSH) et de toundra (ETH). On y observe de grandes amplitudes thermiques journalières et saisonnières, avec des valeurs extrêmes dépassant 15°C (23°C à Linzor, 19°C à Toconce). La variation saisonnière des températures maximales, minimales et moyennes est présentée à la figure 8.

L'isotherme 0°C oscille entre 3 000 m, en hiver, et 4 200 - 4 500 m, en été. Le gradient altitudinal thermique du bassin, défini pour l'ensemble du bassin du Salado (J. Köhnenkamp, 1993) est : $GT = -0,42^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. On verra plus loin le rôle important des températures sur les débits.

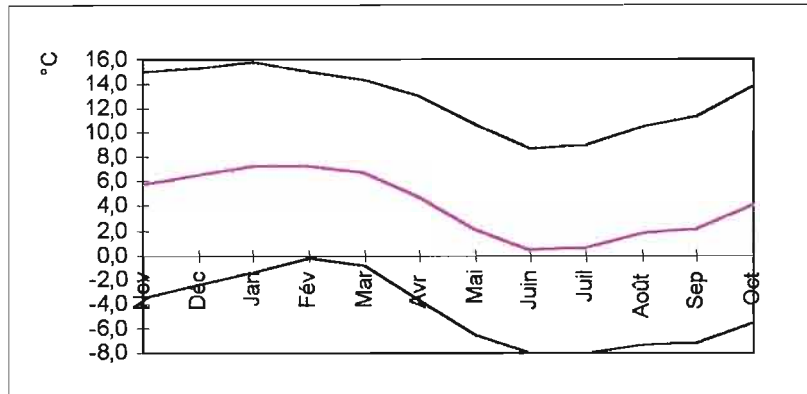


Fig. 8 : Variation saisonnière de la température à la station de Linzor (alt. 4 100 m)

En ce qui concerne les autres variables climatologiques, la direction prédominante du vent est sud-ouest, assez souvent nord-est le matin et, moins fréquemment, certaines rafales viennent du nord et de l'ouest. La vitesse moyenne oscille entre 4 et 8 km/h. L'humidité relative est faible, sauf pendant les épisodes pluvieux, et les valeurs oscillent entre 10 et 40%, pour une moyenne annuelle de l'ordre de 30%. Il n'existe pas de mesure directe de la radiation solaire sur le bassin mais les stations proches montrent qu'elle peut atteindre $1,2\text{ kW/m}^2$ en été. Les valeurs de l'évaporation, qui découlent directement de ces variables, se situent normalement entre 2 et 8 mm/jour selon l'époque de l'année. Le tableau suivant montre les valeurs moyennes journalières obtenues chaque mois aux stations de Toconce (3 300 m) et de Linzor (4 100 m).

EVAPORATION MOYENNE (mm/jour) BAC CLASSE A												
STATION	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Toconce	8.1	7.7	6.9	6.3	5.4	4.8	5.0	5.8	6.7	7.7	8.4	8.4
Linzor	6.7	6.1	6.0	5.4	4.0	3.1	3.5	4.0	4.6	6.2	7.1	7.5

En ce qui concerne la couverture du sol, la végétation est rare. Le *tolar*, arbrisseau de couleur gris-vert foncé, dense, touffu et à toutes petites feuilles, constitue l'espèce prédominante. On trouve aussi des cactus et quelques graminées jusqu'à environ 3 800 m. Au-dessus, jusqu'à 4 500 m, on ne trouve guère que la *paja brava*, graminée xérophyte.

Quant au contexte géologique, une grande partie du bassin est constituée de différents types d'ignimbrites (principalement de composition andésitique, rhyolithique et dacitique), souvent entaillées de profonds ravins contrôlés par des failles ou des fractures d'origine tectonique. Selon leurs caractéristiques pétrographiques, leur degré de consolidation et le type de fracturation, on peut distinguer 4 unités appartenant à deux âges géologiques différents : la formation *Toconce* (6,2 à 6,8 Ma), l'ignimbrite *Siphon* (7,8 Ma) et l'ignimbrite *rivière Salado* (9,3 Ma) du Miocène Supérieur, et l'ignimbrite *Puripicar* (4,5 Ma), du Pliocène Inférieur. Les deux premières sont celles qui ont la plus grande extension et qui jouent un rôle majeur dans les transferts d'eau souterraine.

La formation *Toconce* (Lahsen, 1969) correspond à une séquence d'ignimbrites principalement composée de tufs à éléments anguleux, de débris de pierre ponce et de clastes de rhyolithe, le tout noyé dans une matrice rougeâtre comportant des intercalations de sédiments continentaux détritiques peu consolidés. Pour sa part, l'ignimbrite *Siphon* (Guest, 1969) est surtout constituée de tufs dacitiques de couleur gris et brun clair, généralement bien consolidés, souvent cristallisés, parfois coupés de micro-réseaux de fractures.

Etant donné le volcanisme actif récent et actuel, les strato-volcans qui forment la cordillère ont couvert une partie du paysage de coulées de laves hétérogènes, le plus souvent de composition andésitique et dacitique, attribuées à l'intervalle Miocène Inférieur -Holocène. L'ensemble principal se situe au Pléistocène Supérieur et, au plan lithologique, est constitué d'andésites à pyroxènes ou à hornblende et de dacites à hornblende et biotite ; il est en partie recouvert par des dépôts glaciaires et des moraines. Parmi les volcans représentatifs de cet ensemble, on peut citer les strato-volcans Linzor (5 610 m), León (5 760 m), Toconce (5 419 m), Deslinde (5 506 m), Volcán (5 547 m) et Tatio (5 208 m). Il existe aussi des émissions volcaniques nées de fractures et formant des dômes volcaniques, tel celui du Chillahuita dont le volume a été estimé à 2,6 km³.

Certains volcans anciens (porphyres dacitiques) datée du Miocène, ont été soumis à une très intense érosion, disséqués et creusés de profondes ravines. Parmi eux on peut citer les dômes de Copacaya et de Piedras Grandes.

Le reste du bassin est occupé par quelques formations détritiques anciennes ou alluvionnaires récentes. Sous le nom de formation *Lomas Negras* (Lahsen, 1969), on trouve une séquence hétérogène de roches sédimentaires clastiques et de roches volcaniques où on relève la présence de grès, d'argilites et de marnes multicolores, avec des intercalations de laves andésitiques et des lentilles de grès calcaires à faune marine attribués au Crétacé. La formation *San Pedro* (Bruggen, 1942), d'âge situé entre l'Oligocène Supérieur et le Miocène Inférieur, est formée d'une séquence d'argiles rouges gypseuses, de grès gris ou rouges, de conglomérats grisâtres et de puissantes couches de halite et de gypse. Signalons enfin des séries d'alluvio-colluvionnaires correspondant à l'érosion des versants et aux dépôts consécutifs à l'enfoncement du réseau hydrographique lors des réajustements tectoniques du surgissement des Andes.

Il est certain que le contexte géologique général ne paraît pas a priori très propice à la constitution de grands réservoirs souterrains. Il faut cependant en retenir l'extrême hétérogénéité et considérer que bon nombre des formations de tufs et des intercalations clastiques détritiques ont, d'une part, une assez bonne perméabilité et, d'autre part, des macros ou microfractures très favorables à l'accumulation et au transfert de l'eau. Le fait d'être interstratifiées entre des formations plus imperméables, bien que constituant à première vue un handicap, doit dans le cas présent être considéré comme un élément positif. Il concourt en effet à limiter les débits de sortie, ce qui, malgré une recharge actuelle pratiquement inexistante, assure une pérennité sans laquelle les réserves accumulées lors des épisodes pluvieux anciens seraient probablement épuisées de nos jours (P. Pourrut, communication personnelle).

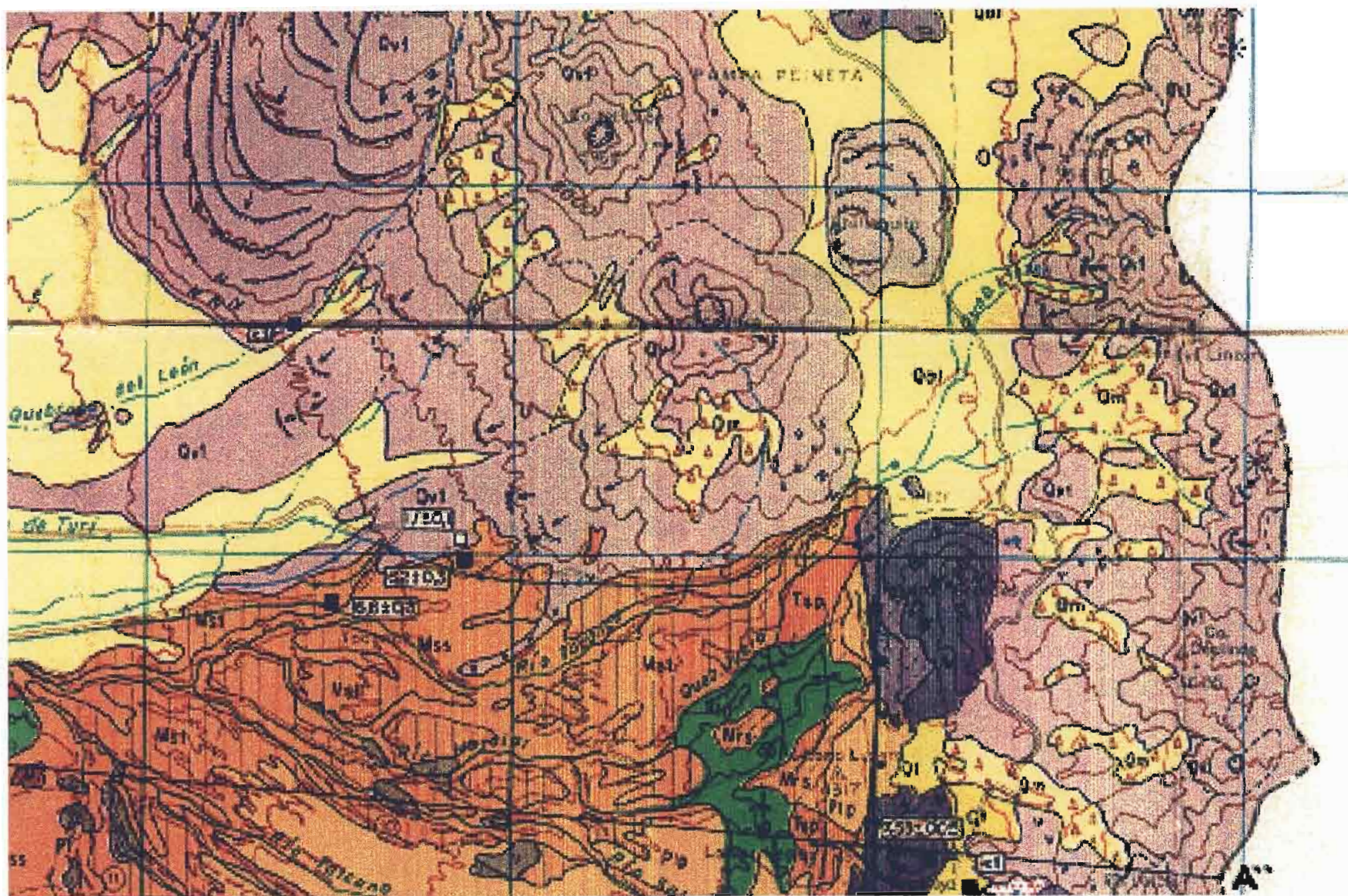


Fig. 9 .- Carte géologique du bassin Toconce

A.2.2.- Les ouvrages hydrauliques et les captages dans le bassin

A.2.2.1.- Introduction

Bien que le bassin soit de taille réduite, la ressource hydrique qu'il fournit est particulièrement attractive dans cet environnement désertique ; cela a entraîné la construction de différents types d'ouvrages.

Tout d'abord, le petit village Toconce a une population d'environ 100 habitants, dont l'activité principale est l'agriculture et, de façon moins importante, le pâturage et l'artisanat. Installé sur le piémont sud de la rivière Toconce, en face des volcans Paniri, León et Toconce, il a développé une agriculture de subsistance pendant des siècles sur des petites parcelles en terrasses aménagées sur les pentes escarpées qui bordent la rivière.

Les terrasses sont bien organisées, avec un réseau complexe de canaux alimentés par des captages situés à l'amont dans la rivière Toconce. Il existe quatre périmètres de parcelles cultivées, ordonnées de l'ouest vers l'est : *El Potrero*, *Media Quebrada*, *Patillón* et *Toconce*. Les deux premiers couvrent une surface très petite (un peu plus de 0,7 ha), tandis que le dernier est le plus grand avec une surface aménagée de 60 ha environ. Cependant, par manque de ressource hydrique suffisante pour l'irrigation, à peu près un quart de la surface totale est réellement mis en culture avec principalement de la luzerne et quelques légumes, surtout destinés à l'autoconsommation.

Chaque périmètre a son propre captage. Les trois premiers s'approvisionnent directement dans la rivière Toconce, tandis que le périmètre *Toconce* possède une prise sur la conduite ESSAN destinée à l'alimentation en eau potable des grandes villes de la région.

Le réseau d'irrigation est constitué de petits canaux de forme rectangulaire de section approximative 0,40 x 0,40 m. Seul le périmètre *Toconce* a des canaux revêtus, sur environ 90% de son tronçon principal. Tous les autres sont en pierre sans maçonnerie. Certains ont été taillés dans la roche qui constitue les berges de la rivière. D'une longueur d'environ 9 000 m, le réseau principal possède une structure en forme d'arête de poisson, avec un tronçon central (ou parfois latéral), d'où partent les canaux secondaires qui irriguent les petites parcelles.

Pour chacun des périmètres la longueur du canal principal est donnée dans ce tableau :

CANAL	LONGUEUR (m)
El Potrero	485
Media Quebrada	325
Patillón	3 460
Toconce	4 485

Les captages sur la rivière sont de petits barrages au fil de l'eau, qui coupent partiellement la section transversale. Ils sont construits en pierres et détournent un petit débit vers le réseau de canaux. Il n'existe pas de section de contrôle aménagée pour

connaître le débit capté. De rares jaugeages ont été faits au moulinet. Les pentes, dans les canaux principaux sont faibles, généralement inférieures à 4‰.

D'autres ouvrages hydrauliques, ainsi que deux stations climatologiques, existent sur le bassin ; ce sont :

- une station de contrôle hydrométrique ;
- deux microcentrales hydroélectriques ;
- cinq captages d'eau superficielle ;
- diverses conduites.

Ces ouvrages sont décrits ci-dessous depuis l'amont vers l'aval. Cette description est complétée par les figures 10 à 14, ce qui permet de mieux comprendre les situations géographiques et l'agencement opérationnel de l'ensemble de ces aménagements. Par souci de clarté, le système complet est divisé en trois sous-systèmes : *Piedras Grandes*, *Linzor* et *Toconce*

A.2.2.2.- Sous-système Piedras Grandes (Fig. 10)

Le premier ouvrage est un captage superficiel de l'une des sources de la rivière Hojalar, qui, rappelons le, se jette dans la rivière Toconce à l'aval du village de Toconce. Cette rivière est constituée par deux bras principaux : un bras nord, le *ruisseau Piedras Grandes* (dont le nom devient *rivière Hojalar* quelques kilomètres à l'aval) et un bras sud, la *Quebrada* (ravine) *Chillaguar*. La partie haute du ruisseau Piedras Grandes est captée par la société CODELCO, qui exploite à Chuquicamata (à environ 100 km) la plus grande mine de cuivre du monde, pour faire fonctionner une microcentrale hydroélectrique dont l'énergie est destinée à l'usine de pré-traitement des eaux de Linzor (voir paragraphe suivant). Le captage consiste en un mur transversal au cours d'eau, avec un déversoir à seuil épais et un petit bassin qui permet l'alimentation d'une canalisation métallique. L'eau déviée passe par deux décantateurs avant d'être mise en charge dans un tuyau d'acier ($\Phi = 250$ mm, L = 800 m) qui l'amène vers la microcentrale. L'eau restante passe par le déversoir et s'écoule dans le lit naturel du cours d'eau.

Immédiatement après la microcentrale, un nouveau captage récupère son débit de fuite et les écoulements du ruisseau. Il comprend aussi un mur transversal, un déversoir et un bassin de mise en charge, ici latéral, qui permet de concentrer tout le débit dans une nouvelle conduite et de le transférer vers la rivière Toconce. L'ouvrage consiste en un mur de 8 m de longueur et 0,6 m de hauteur, avec une grille à l'entrée du bassin de mise en charge. Celui-ci comprend un compartiment en eau de 2,0 x 1,2 m et un compartiment sec de 1,2 x 1,2 m, où se trouve une vanne ($\Phi = 450$ mm). La conduite est formée de tubes en béton armé centrifugé de $\Phi 450$ mm et de 3 100 m de longueur, avec 21 regards d'inspection. La pente longitudinale de la conduite est de 2‰. Cette conduite se déverse à la tête d'une ravine qui conflue naturellement avec la rivière Toconce.

Les coordonnées (mesurées au GPS) des deux ouvrages sont les suivantes :

- captage P. Grandes : 22° 13' 57" S, 67° 59' 54" O, alt. 4 220 m
- microcentrale / captage « 2 » : 22° 13' 53" S, 68° 00' 15" O, alt. 4 180 m

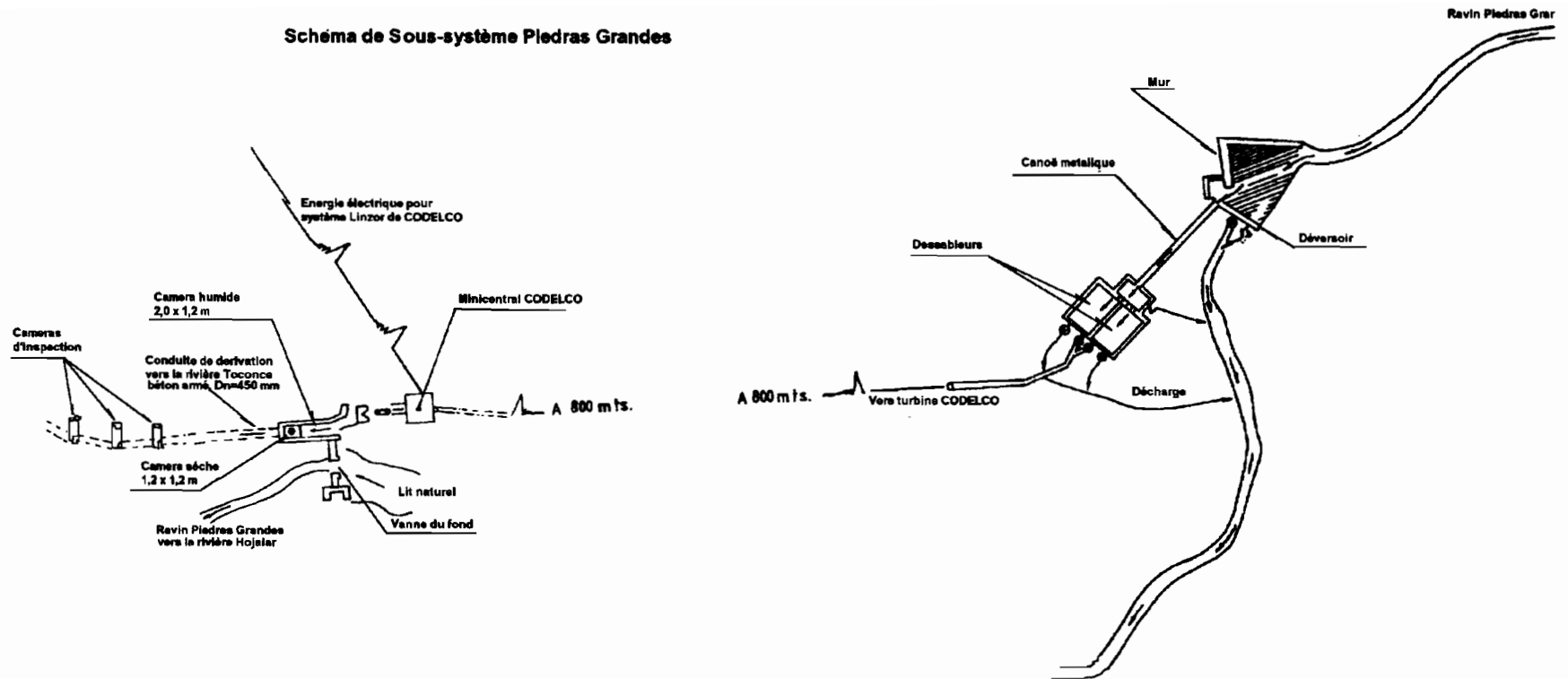


Fig. 10 : Sous-système Piedras Grandes. Captages minicentrale CODELCO et dérivation vers la rivière Toconce.

A.2.2.3.- Sous-système Linzor (Fig. 11)

Le sous-système *Linzor* est assez complexe ; les premiers ouvrages datent de 1942.

Tout d'abord, il y a un *champ de captage* constitué par un ensemble de constructions en béton armé, murs et dalles, destinées à concentrer des écoulements de diverses sources éparses sur plusieurs versants au nord de la ravine ; leurs débits sont rassemblés dans un bassin de mise en charge et acheminé dans une conduite d'acier, vers Chuquicamata. Cette installation, propriété de la société CODELCO, est destinée à l'alimentation en eau potable de la ville minière. La conduite possède un diamètre $\Phi = 225$ mm sur une longueur de 97,570 km. A proximité du captage, une petite usine fait les premiers traitements : extraction de l'air, filtration. L'énergie nécessaire est fournie par la microcentrale de Piedras Grandes, déjà décrite.

Pour capter à la fois les écoulements de sources sur des versants plus à l'amont (*Ojos Mayor* et *Menor* de la ravine Linzor, versants de coulée dacitique) et également les fuites du captage de CODELCO, un nouveau barrage formant une petite retenue est construit immédiatement à l'aval de l'usine de CODELCO. Deux captages submergés récupèrent l'eau disponible :

- l'un vers une conduite de l'ESSAN (Entreprise de Services Sanitaires d'Antofagasta, chargée de la production et la distribution de l'eau potable pour la région) relié au réseau de conduites que cette entreprise a mis en place pour l'alimentation en eau potable des grandes villes du désert (principalement Antofagasta et Calama).
- l'autre correspond à la fuite de la retenue ; il se déverse dans le cours d'eau naturel qui conflue avec la rivière Toconce à l'aval du rejet du captage de Piedras Grandes.

La conduite d'ESSAN a presque de 20 km de longueur ; elle présente deux parties de caractéristiques différentes. La première partie, la plus longue (17,3 km) et la plus ancienne, est en acier avec un diamètre $\Phi = 300$ mm. Les premiers 4,5 km sont en très mauvais état et actuellement inutilisables. Le tronçon restant est en amiante avec des diamètres $\Phi = 250$ et 300 mm, sur des longueurs respectives de 1 834 et de 705 m ; il possède trois bassins dissipateurs d'énergie intermédiaires, avant d'arriver au système de décantateurs installé par ESSAN à l'aval du village de Toconce. De façon générale, la conduite a un tracé qui suit la vallée de la rivière Toconce.

Enfin le sous-système Linzor possède une station climatologique à proximité des installations de captage et de l'usine de traitement de Linzor. Elle appartient à la Direction Général des Eaux (DGA) du Ministère des Travaux Publics. Elle a été construite en novembre 1973 et équipée progressivement depuis cette date de divers instruments :

- un pluviomètre et un hygrographe, à partir de novembre 1973 ;
- des thermomètres maximum et minimum, et un anémomètre, depuis décembre 1973 ;
- un bac classe A, installé en novembre 1974 ;
- un actinographe, à partir d'août 1975 ;
- un pluviographe, depuis janvier 1978 ;
- une girouette, depuis avril 1981 ;
- un psychromètre, à partir de janvier 1988.

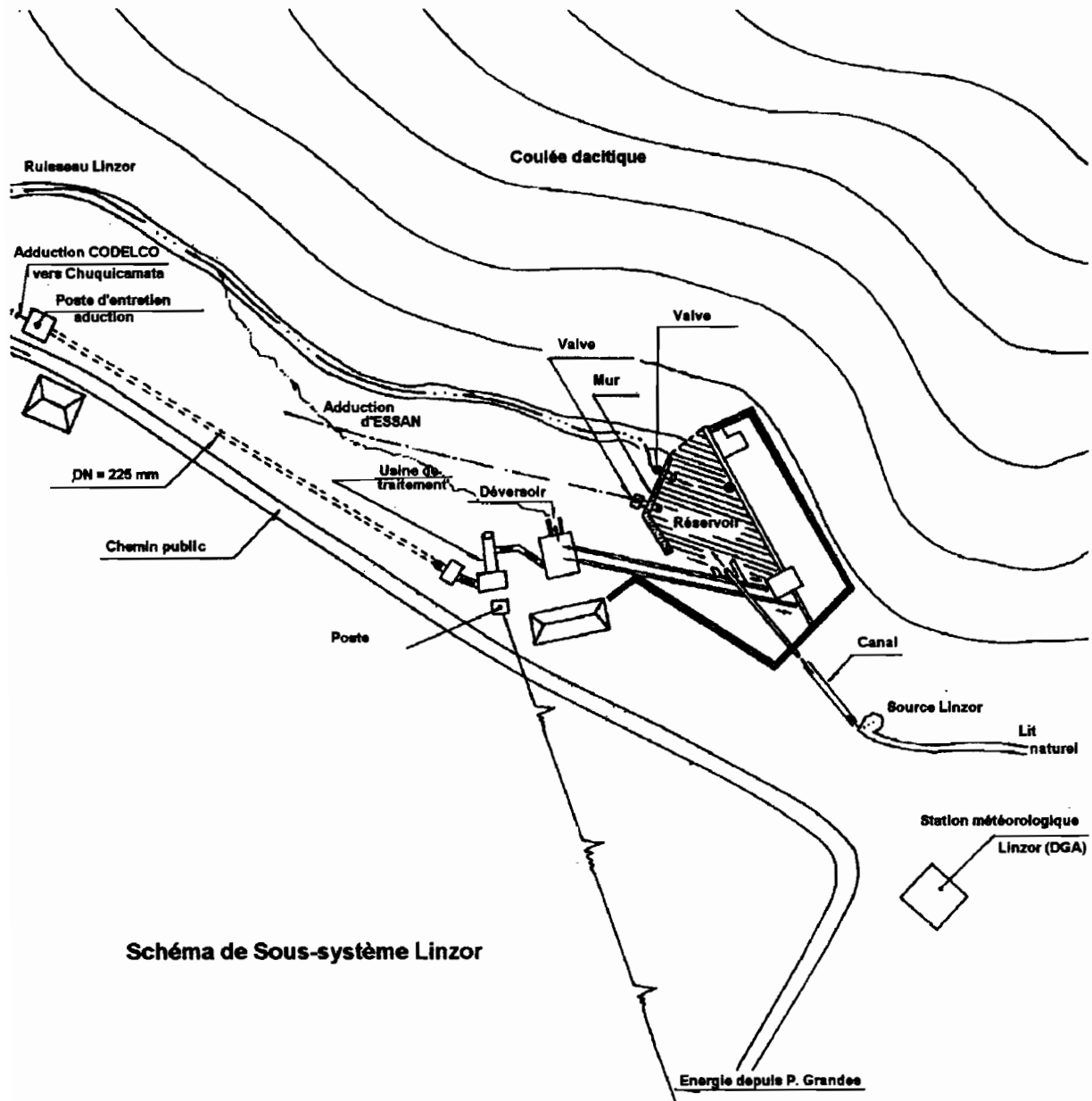


Fig.11 : Sous-système Linzor. Captages CODELCO et ESSAN, et station météorologique de la DGA.

Ses coordonnées géographiques (qui sont aussi ceux des différents captages) sont :

22° 12' S 67° 59' O alt. 4 096 m

A.2.2.4.- Sous-système Toconce

C'est, en terme de volume hydraulique traité, le principal sous-système du bassin. La ressource captée est exploitée pour trois objectifs différents :

- i) l'irrigation agricole, à travers le réseau de canaux déjà décrit précédemment ;
- ii) la production d'énergie, par le moyen d'une microcentrale qui fournit de l'électricité au village de Toconce pendant quelques heures chaque nuit
- iii) la fourniture d'eau potable pour la société ESSAN qui prélève à proximité du village tout le débit de la rivière, apportant une contribution majeure au réseau régional d'alimentation en eau potable.

La microcentrale a été installée en 1958 en rive droite de la rivière, à 2,5 km à l'amont du village. La prise d'eau se trouve à environ 500 m à l'amont et se compose d'un bassin de béton, de forme rectangulaire concentrant l'écoulement de la rivière, d'un compartiment pour la mise en charge de la conduite forcée à gauche du mur principal et d'un déversoir à l'entrée du bassin qui laisse passer le débit non utilisé par la centrale. La conduite forcée est en acier, $\Phi = 650$ mm ($D_i = 660$ mm) sur 490 m de longueur. Son tracé est toujours parallèle à la rivière.

Pour l'eau potable, ESSAN a installé deux captages :

- Le captage principal, à environ 300 m à l'aval de la microcentrale, est un mur de béton, transversal à la rivière, de 12 m de largeur et de 2 m de haut, avec une vanne de fond à son extrémité sud. En rive gauche se trouve un bassin de mise en charge recouvert d'une dalle, de dimensions 5 x 2,80 m. Ce bassin alimente deux conduites, l'une de $\Phi = 550$ mm et autre de $\Phi = 650$ mm, qui s'unissent 50 m à l'aval en une seule de $\Phi = 650$ mm ($D_i = 660$ mm) et de 3 305 m de longueur jusqu'aux dessableurs construits après le village. C'est sur cette conduite qu'est opéré le prélèvement pour le périmètre agricole *Toconce* 700 m à l'aval du captage : il s'agit d'une vanne de $\Phi = 140$ mm, suivie d'une réduction à $\Phi = 120$ mm qui se déverse directement dans le canal principal d'irrigation.
- Le second captage d'ESSAN est une installation de secours construite juste à l'aval de la microcentrale. Il sert pendant les opérations de nettoyage du captage principal. Il est constitué d'un mur de béton qui concentre ensemble l'écoulement de la rivière et la fuite de la microcentrale et les envoie soit vers le bassin de mise en charge de la conduite, soit vers le cours naturel de la rivière au travers d'une vanne du fond (c'est le mode fonctionnel de routine). La conduite d'acier, $\Phi = 650$ mm et 321 m de longueur, se déverse dans le bassin de mise en charge du captage principal.

Tous les prélèvements opérés par ESSAN (sous-systèmes *Linzor* et *Toconce*), aboutissent dans une usine de traitement située à environ 3 km à l'aval du village qui comporte principalement des dessableurs, des décanteurs et un bassin de régulation d'où commence l'adduction vers les grandes villes.

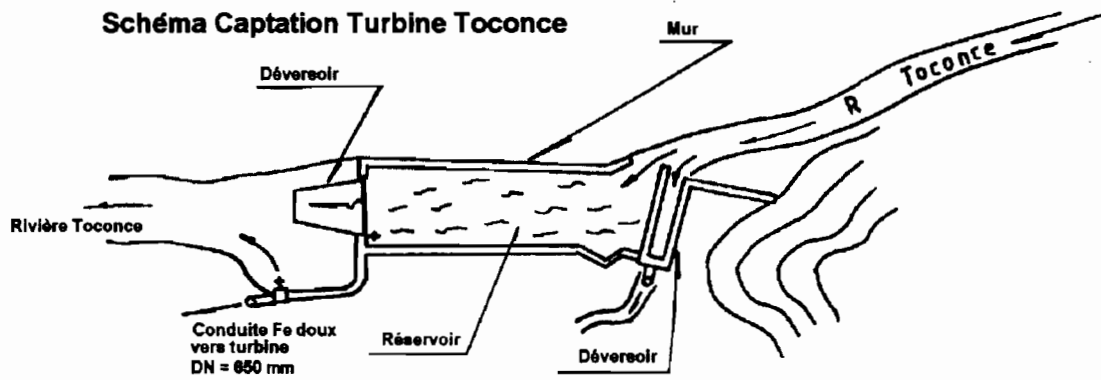


Fig.12 : Sous-système Toconce. Captation pour minicentrale du petit village Toconce.

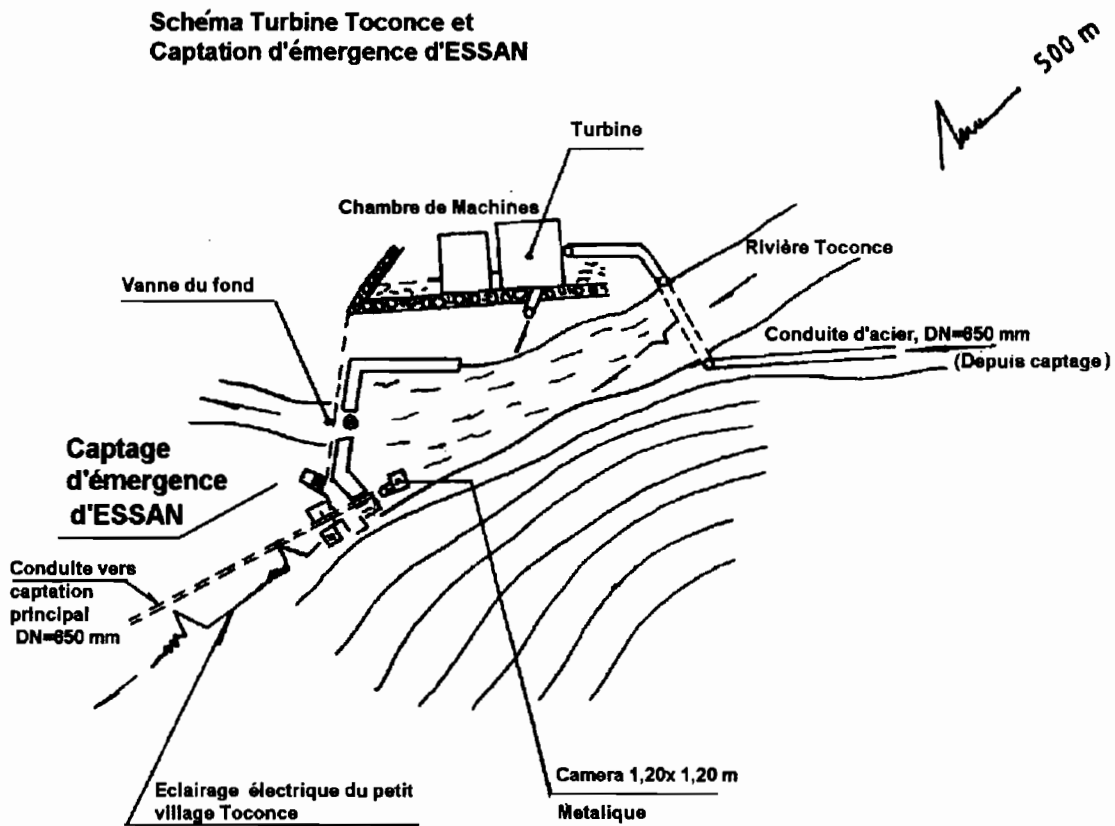


Fig. 13 : Sous-système Toconce. Minicentrale Toconce et captation d'urgence d'ESSAN.

**Schéma Captation ESSAN et
Captation Canal Toconce**

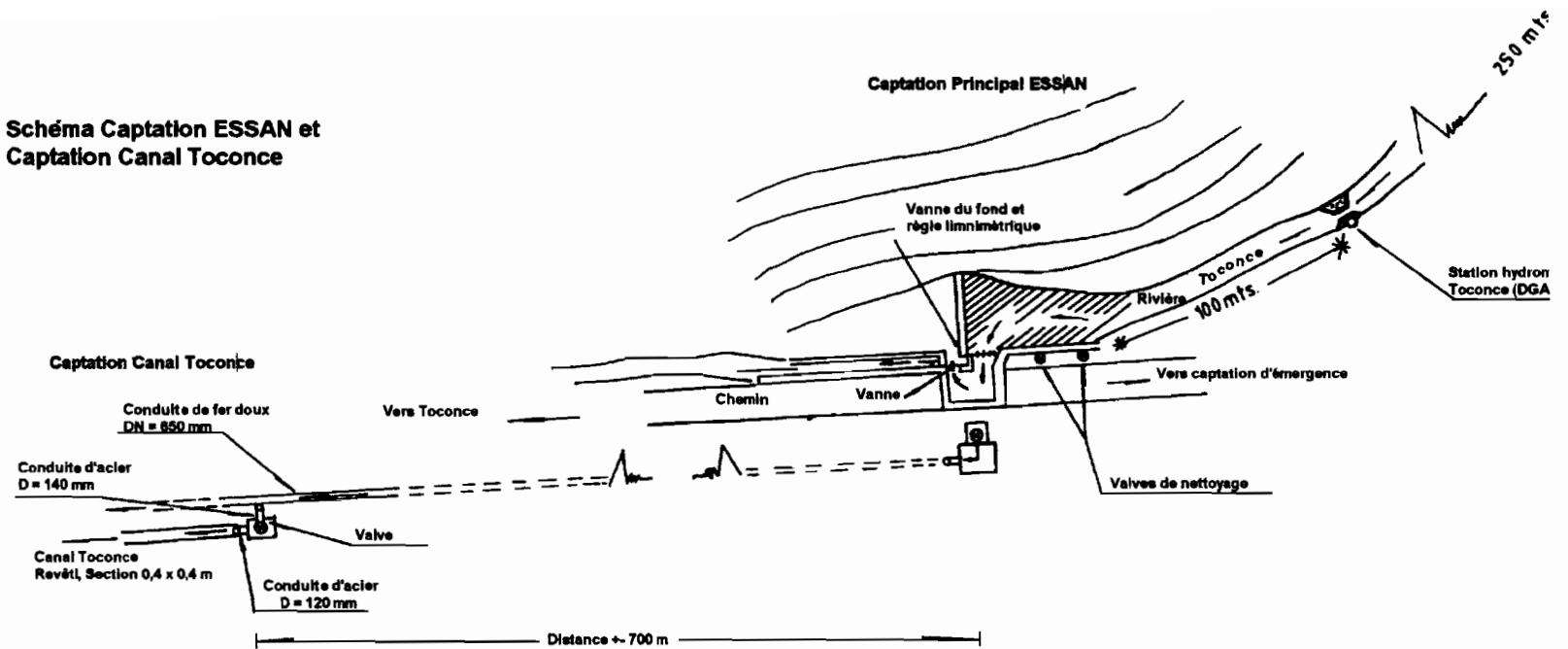


Fig. 14 : Sous-système Toconce. Captation principal d'ESSAN et captation pour l'irrigation du secteur agricole Toconce, avec le canal Toconce.

Entre les deux captages de Toconce et plus proche du captage principal, se trouve la seule station hydrométrique du bassin versant. En opération depuis mars 1982, cette station de la DGA fournit des enregistrements limnigraphiques depuis novembre 1982. La section de contrôle (fig. 15) est constituée par un seuil jaugeur de type Parshall avec une étranglement de 61 cm pour une hauteur de 1 m. Le déversoir de crue est formé par des dalles en maçonnerie de part et d'autre du seuil jaugeur sur deux niveaux successifs en rive gauche et un seul en rive droite. La station se trouve dans une partie étroite du canyon dans lequel coule la rivière, ce qui en rend l'accès difficile, voire impossible, pendant les crues. Un risque de submersion (et de destruction) du limnigraphe n'est pas à écarter.

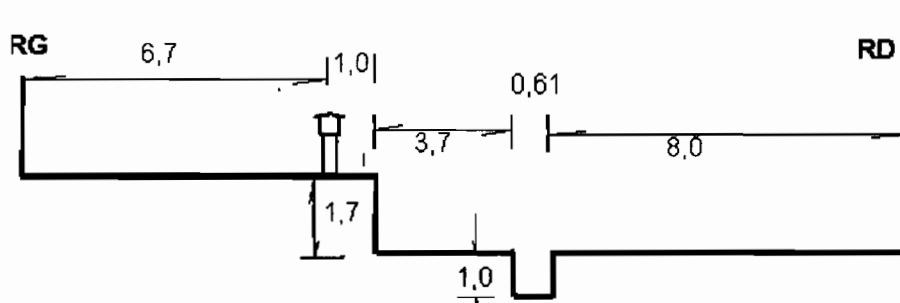


Fig 15 : profil en travers de la station hydrométrique de Toconce

Il existe enfin dans le village une station climatologique de la DGA. Construite entre des maisons, elle ne respecte pas les conditions optimales d'installation et ses observations sont un peu perturbées par son environnement (quelques arbres, des constructions proches). La station comprend :

- un pluviomètre, installé en mars 1972
- un pluviographe, installé en décembre 1978
- un bac d'évaporation, Classe A, installé en juillet 1975
- des thermomètres maximum et minimum, installés en juillet 1975.

Les coordonnées géographiques de la station climatologique sont les suivantes :

22° 16' S 68° 11' O alt. 3 350 m

A.2.3.- Fonctionnement opérationnel du système

La manutention du système en mode opérationnel est étroitement liée au régime hydrologique du bassin versant et de ses sous-bassins. Tous les ouvrages ont été projetés pour une capacité qui a été déterminée en fonction de la disponibilité hydrique au site d'installation. Dans certains cas la disponibilité hydrique est supérieure à la capacité installée (captages pour les microcentrales de Piedras Grandes et de Toconce), tandis que dans d'autres cas, c'est la capacité installée qui est supérieure à ce que fournit le bassin versant (captages de Piedras Grandes « 2 » et de Toconce pour l'eau potable). Cette situation est la conséquence de la pauvreté en données observées d'écoulement au moment où les ouvrages ont été projetés ; on ne peut d'ailleurs pas dire que, à l'exception notable du site hydrométrique de Toconce, cela se soit beaucoup amélioré depuis.

Dans le sous-système *Piedras Grandes*, quelques jaugeages à différentes périodes (mais jamais opérés systématiquement) suggèrent un débit de base minimum de 70 l/s pour la source. Les captages ont une capacité limitée par le diamètre des conduites : vers la microcentrale, la capacité est de 47 l/s, et, vers la rivière Toconce, elle est de 130 l/s. Cette dernière conduite détourne donc tout le débit de base du sous-système *Piedras Grandes*, vers la rivière Toconce. Si le débit est supérieur à 130 l/s, l'excédent s'écoule dans le lit naturel vers la rivière Hojalar et plus tard vers la rivière Salado. La microcentrale fonctionne sans interruption.

Dans le sous-système *Linzor*, les écoulements du bassin sont concentrés dans un seul endroit où se trouvent les deux captages existants. Il n'existe que très peu de mesures des écoulements, mais toutes suggèrent un débit de base minimum d'environ 165 l/s. CODELCO, qui enregistre les débits en fin de conduite (donc sans les pertes en ligne par fuites diverses), ne fournit pas ces informations considérées comme des secrets industriels, même pour les administrations régionales. On estime officiellement que l'entreprise prélève 50 l/s à Linzor ce qui correspond aux installations projetées et à son droit légal ; mais depuis quelques années, la conduite a subi divers chantiers d'amélioration qui ont pu augmenter sa capacité de transport de quelques dizaines de l/s. L'autre conduite du sous-système, celle d'ESSAN, est actuellement hors service. Sa capacité initiale était de 140 l/s et elle peut facilement être réhabilitée avec le remplacement des 4,5 premiers km, correspondant au mauvais tronçon. Aujourd'hui, tout ce qui n'est pas capté par CODELCO, ainsi que la production de sources situées ou confluant à l'aval du champ de captage de Linzor, s'écoule dans le lit naturel vers la rivière Toconce.

En fin, dans le sous-système *Toconce*, l'information est meilleure. Tout d'abord, il y a la station de contrôle hydrométrique, mais aussi il existe des jaugeages en divers points du cours principal à l'amont et à l'aval de la station de contrôle, plus nombreux que pour les autres sous-systèmes. Les captages sont mieux connus et mieux contrôlés. Les prises d'eau pour l'irrigation, ainsi que le captage pour la microcentrale, ne fonctionnent que quelques heures par jour. Pour les deux premiers périmètres irrigués, *El Potrero* et *Media Quebrada*, le débit dérivé est respectivement de 0,50 l/s et 0,35 l/s. Pour le périmètre *Patillón*, le débit dérivé est d'environ 13,5 l/s durant 4 heures par jour. Le captage pour la microcentrale est calculé sur la base d'un débit de 300 l/s (capacité de la conduite forcée), mais il n'est actif que 4 heures par jour entre 19 et 23 heures. Il faut noter, cependant, que la turbine est ancienne : elle peut être changée dans un avenir proche et avoir un protocole d'opération différent.

A l'aval de ces ouvrages, se trouvent les captages d'ESSAN et la station hydrométrique. Les deux captages sont projetés pour un débit de 570 l/s, rarement atteint par la rivière en cet endroit. Enfin, la prise d'eau sur la conduite ESSAN pour le périmètre irrigué de *Toconce* est conditionnée par la pression dans la conduite. En condition normale le débit dérivé est d'environ 25 l/s, ce qui correspond à la fourniture légale qu'ESSAN doit aux agriculteurs. Pendant les crues importantes, les captages d'ESSAN sont fermés pour éviter la saturation de l'usine de traitement de l'eau.

La fig. 16 ci-après correspond à un schéma général du système ; elle vient en complément de la fig. 17.

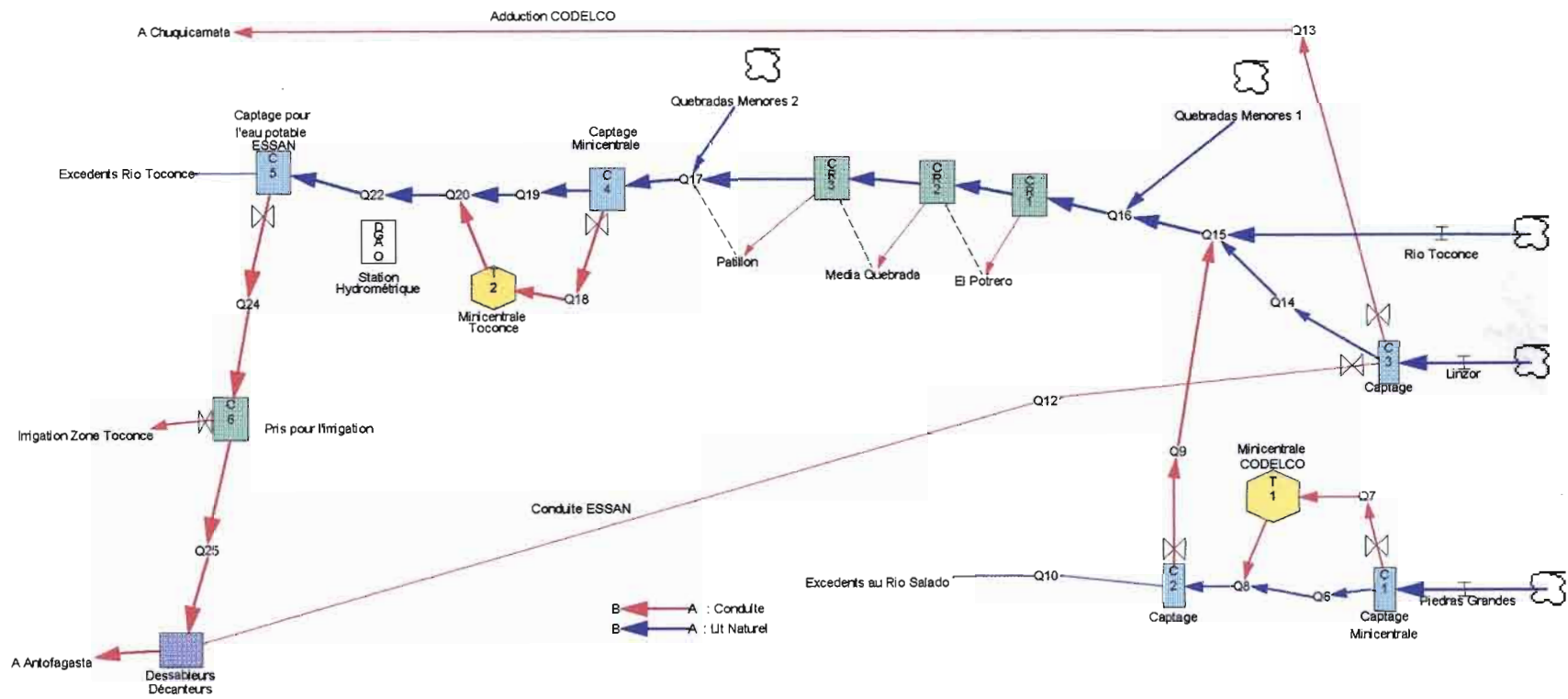


Fig. 16 : Schéma de fonctionnement général du système Toconce.

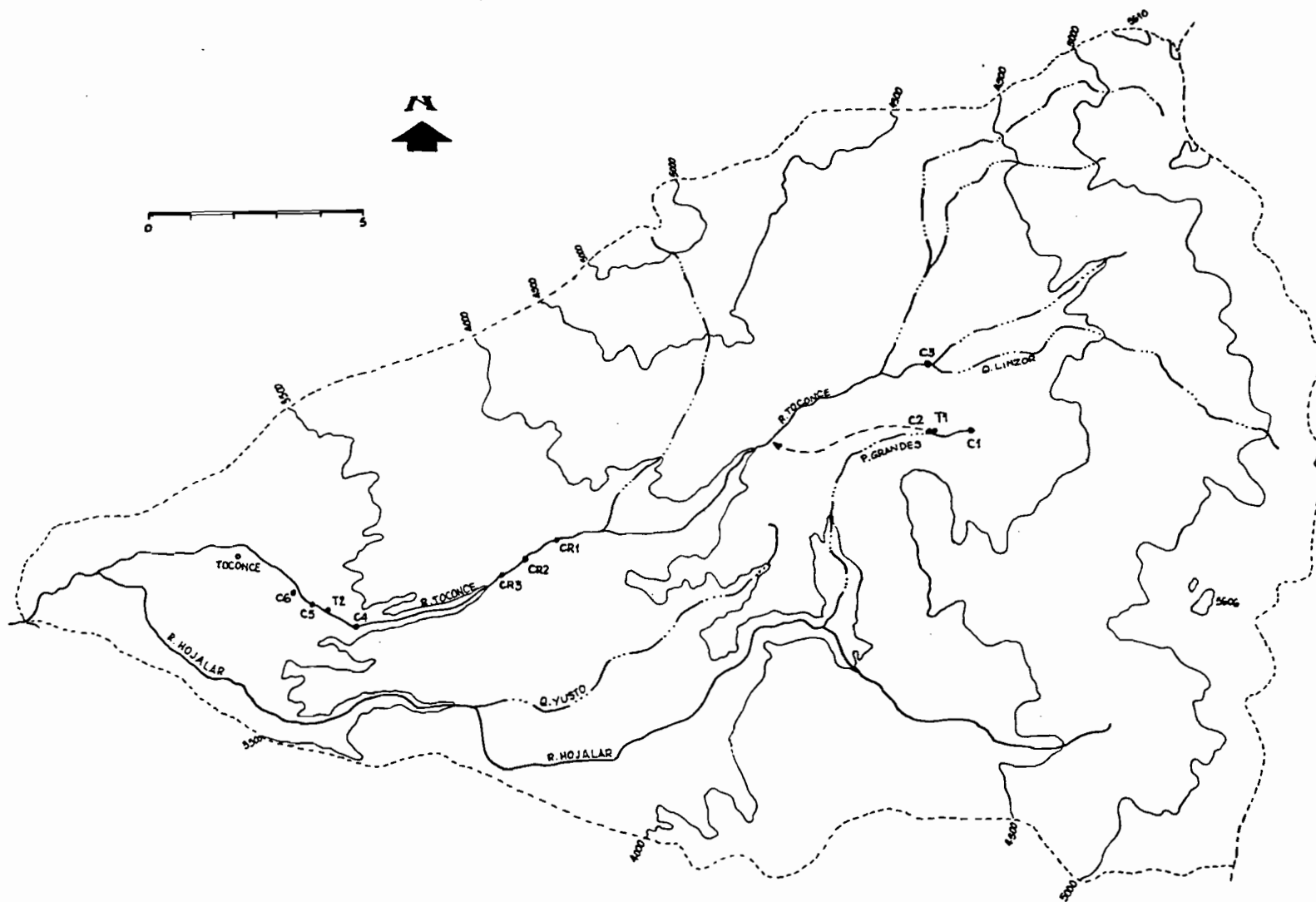


Fig. 17 : Bassin versant du Toconce. Situation des captages hydrauliques. Notation selon schéma précédent.

B - LE LOGICIEL VENSIM®

B.1.- Généralités

VENSIM® (pour *Ventana Simulation Environment*, marque déposée de la société américaine Ventana Systems Inc., diffusée en France par la société KBS à Paris) est, parmi d'autres logiciels du même type disponibles dans le commerce, un outil de modélisation destiné à mieux comprendre diverses situations de la vie réelle. Le domaine d'application de ce outil est étendu : simulations de situations économiques, de gestions domestiques, etc., et même résolution de problèmes techniques ou de recherche. La version utilisée pour cette étude est la version 1.62 (1995) qui fonctionne sur micro-ordinateur de type P.C. avec le système d'exploitation Microsoft Windows® v. 3.1 ou Microsoft Windows 95®.

Ce logiciel est organisé en trois groupes d'outils :

- ceux qui sont relatifs à la construction et à la représentation graphique du modèle ;
- les propres outils de simulations, permettant la gestion des données, la définition des équations qui lient les différentes grandeurs et l'optimisation des paramètres de réglage ;
- les outils d'analyse et d'interprétation des résultats

Les fonctionnalités de ces trois groupes sont succinctement présentées ci-après pour mieux comprendre l'intérêt de cet outil, ses apports et son adaptabilité à la résolution de l'étude développée dans ce mémoire. Pour une approche complète et détaillée, le lecteur se reportera à la documentation abondante fournie avec le logiciel, Manuel de Référence et Guide de l'Utilisateur.

B.2.- Les outils de VENSIM®

B.2.1.- Construction et représentation graphique du modèle

Le logiciel offre un ensemble d'outils que l'on visualise graphiquement à l'écran permettant de donner une structure logique aux idées désordonnées que l'on a d'un certain phénomène ou événement ou processus. Ils se présentent en deux types d'éléments : les *concepts* et les *connecteurs*. Les premiers sont qualifiés de *variables*, et, par suite, sont associés à l'idée préconçue qu'ils participent sous une forme quelconque à l'événement étudié ; ils revêtent différentes formes selon leur comportement ou leur importance. Pour connecter ces *concepts* entre eux, VENSIM® utilise deux types d'éléments : des lignes avec flèche (*connecteurs directs*) et des conduites avec des vannes permettant de faire contrôler les flux entre deux variables par d'autres variables.

Toutes les *concepts* doivent avoir au moins un *connecteur*. Une fois établi, l'ensemble de connections, les variables se présentent sous deux formes d'interaction : soit comme *variables d'entrée*, que l'on peut identifier dans des bases de données générées en mode interne ou externe au logiciel, soit comme *variables d'opération* qui doivent être complètement définies par les équations qui font l'objet de la simulation.

Pour décrire les équations, VENSIM® utilise un langage algébrique simple (dont la syntaxe est proche du langage informatique Basic) auquel on accède soit à partir de la représentation relationnelle graphique par un éditeur d'équations qui génère le code associé, soit par un éditeur de texte qui ne nécessite pas de représentation graphique préalable.

B.2.2.- La simulation

Pour la simulation, VENSIM[®] requiert deux préalables :

- un modèle complet avec toutes les équations et les connexions qui lient les différentes variables (le modèle considère que toutes les variables non définies sont des variables d'entrée) ;
- une base de données d'entrée.

Il faut ensuite définir le pas de temps élémentaire de la simulation. Il correspond généralement à celui de la base de données d'entrée.

Les données peuvent provenir de la lecture d'un fichier extérieur ou être créées par un module interne du logiciel dont les capacités opératoires sont limitées. Il est donc plus facile, plus commode et plus souple, d'opérer avec des fichiers élaborés avec des outils spécifiques. VENSIM[®] supporte les fichiers *texte ASCII* où les données sont présentées en colonnes avec les extensions *.DAT* ou *.TAB*, ou bien les fichiers de tableurs aux formats Lotus 123[®] (v.2.0 et antérieures, extension *.WK1*) ou Microsoft Excel[®] (v.4.0 et antérieures, extension *.XLS*). VENSIM[®] transforme ces formats dans son format de travail propre (extension *.VDF*) pour les utiliser dans le modèle.

Une fenêtre de contrôle de la simulation, assez complète et facile à comprendre, permet de suivre les valeurs que prennent les variables au cours du calcul, tant en entrée qu'en sortie. Il est enfin possible de récupérer les valeurs calculées dans les mêmes formats que les fichiers externes d'entrée.

En cas d'erreur au cours de la simulation (par exemple une division par zéro), VENSIM[®] affiche à l'écran un message avec une indication sur la localisation du problème.

Le cas échéant, des simulations dynamiques faisant interagir dans le temps des variables sur elles-mêmes sont possibles ; mais cela exige l'établissement d'équations et une définition des pas de temps appropriés.

B.2.3.- L'analyse et l'interprétation des résultats

L'analyse et l'interprétation des résultats de la simulation peut se faire avec différents outils proposés par le logiciel. Sur des diagrammes, on peut suivre graphiquement le comportement des variables au cours de la simulation liées par une relation du type cause - effet. On peut aussi construire des relations hiérarchiques. Enfin toutes les variables peuvent être exportées sous forme de tableau et ainsi profiter des nombreux outils d'analyse et de calcul disponibles avec les tableurs courants comme Lotus 123[®] ou Microsoft Excel[®]. C'est ce dernier que nous avons utilisé systématiquement pour ce mémoire.

Enfin tous les résultats numériques peuvent être imprimés directement par VENSIM[®], mais avec une mise en page très pauvre et une propension à utiliser inutilement beaucoup de papier. Il est là aussi préférable d'exporter les données dans un tableur qui offrent d'innombrables possibilités de mise en page pour une impression adaptée à l'usage que l'on veut en faire.

2ème Partie

LA MODELISATION DU BASSIN VERSANT TOCONCE

ANALYSE DES RESULTATS

C - LA MODELISATION

C.1.- Considérations générales préalables

L'étude des événements naturels a été toujours une grande préoccupation mais aussi un grand défi pour l'humanité. Durant longtemps, on a été réduit à l'observation et à l'expérimentation de terrain pour proposer des formulations, dites *représentatives* du phénomène. Avec les progrès de la science, dans tous les domaines, mais surtout en mathématique et en physique, on a commencé à proposer des formulations toujours plus complexes dans l'ambition de prendre en compte exhaustivement les relations entre les grandeurs présumés participantes au phénomène. Pour les problèmes d'hydraulique, on a ainsi établi les équations générales de l'écoulement de Navier-Stokes et pour la dynamique des fluides, les équations de Barré de Saint Venant qui permettent, entre autres, l'étude des phénomènes transitoires. Tous ces expressions ont pour objectif de représenter, le plus fidèlement possible, ce qui se passe dans la réalité, c'est-à-dire, de créer une image d'elle ; c'est ce que l'on reconnaît aujourd'hui comme un *modèle*.

Dans cet esprit et notamment grâce aux progrès de la science au cours de ce dernier siècle, les approches dans le domaine de l'hydraulique se sont diversifiées. Trois voies sont possible :

- l'observation de terrain qui est généralement très coûteuse, très lente et souvent difficilement praticable techniquement ;
- la construction de modèles réduits pour l'étude en laboratoire (également coûteuse et lente, mais plus accessible) ;
- la construction et l'utilisation de modèles mathématiques.

Il existe de nombreuses tentatives de classifications des innombrables modèles mathématiques utilisés en hydrologie : on parle de modèles *conceptuels* ou *empiriques*, *stochastiques* ou *déterministes*, *distribués* ou *globaux*, parmi les principales dénominations. Desbordes (1984) ou Dezetter (1987) présentent de bonnes introductions à ces diverses classifications.

Dans le cadre de notre étude, la modélisation adoptée, qui aborde à la fois des questions hydrauliques et hydrologiques, peut être assimilée à une modélisation de type déterministe (en passant sur le fait que la pluie est reconnue comme un phénomène au caractère aléatoire), global et semi-empirique. Le pas de temps utilisé est celui de la journée et les hypothèses sur lesquelles le modèle est construit sont présentées dans les sections ci-dessous.

C.2.- La base de données utilisée

Pour la description de l'ensemble du système hydraulique, les données utilisées sont celles qui correspondent aux conditions nominales de construction et/ou d'opération des ouvrages existants, c'est-à-dire les capacités des captages, des conduites et du réseau d'irrigation. Dans la gestion opérationnelle actuelle du système, la seule inconnue (au moins partielle) est la capacité réelle de l'adduction de CODELCO depuis la captage de Linzor. Toutes les autres sont bien connues et certaines d'entre elles ont été à nouveau validées récemment (voir dans ce mémoire le paragraphe concernant les mesures de terrain). Ces

grandeurs ont été exposées précédemment, avec des schémas pour mieux comprendre leur organisation.

Pour l'hydrologie, les données disponibles dans le bassin se réfèrent à la station hydrométrique de Toconce pour les écoulements et aux stations climatologiques de Linzor et de Toconce pour les précipitations. Nous avons choisi de travailler sur la période de novembre 1982 à août 1994, qui est celle de la disponibilité des données de débit. Les données sont des moyennes journalières pour les débits et des cumuls journaliers pour les précipitations. Dans les deux ensembles de données, il existe des lacunes d'information.

Pour la pluie, ces lacunes sont en quantité assez faible comparée à la durée de la période d'étude de presque 22 ans : 11 mois à Linzor, 4 mois à Toconce. A Linzor situé dans une position centrale du bassin versant, la confrontation sur les périodes de lacune avec des stations proches dans conditions altitude-emplacement similaires (Inacaliri ou Tatio) hors du bassin d'étude montre qu'il n'y a qu'un seul mois perdu avec de véritable précipitation. On considère par conséquent la qualité de ce jeu de données comme tout à fait acceptable pour notre étude. La station de Toconce, possède relativement moins lacunes, mais sa situation en basse altitude à l'aval du bassin la rend moins représentative. L'ensemble de ces données sont fournies en annexe.

Pour les débits, l'information est beaucoup plus déficiente. Il n'y a que deux années complètes sur toute la période et les lacunes coïncident souvent avec les épisodes pluvieux intenses, ce qui rend problématique l'étude de la relation pluie-débit. On pourrait éventuellement tenter de reconstituer l'information manquante en établissant une corrélation avec les stations aval du río Salado. Cela s'avère difficile pour plusieurs raisons. d'abord la station la plus proche se situe à environ 15 km à l'aval (Salado avant le joint Curte), avec une superficie drainée 5 fois plus grande que celle de Toconce, ce qui rend difficile l'établissement d'une correspondance. Ensuite les enregistrements de cette station sont encore plus irréguliers, avec une courbe de tarage moins fiable ainsi que l'a montré Köhnenkamp (1993). Enfin les différentes sources d'alimentation ont des régimes contrôlés : la station Salado A.J. Curte mesure les écoulements de la rivière à l'aval du captage complet de ses deux branches principales, le propre Salado et le Toconce. De plus le captage du Salado est de plus grande taille que celui de Toconce et présente une plus grande capacité de régulation. Plus à l'aval il existe une station mieux contrôlée, mais son éloignement ne peut guère aider à la résolution de la question.

La base de données brutes des débits à Toconce est fournie en annexe de ce mémoire.

On donne quelques autres informations hydroclimatologiques en annexe (y compris quelques références pluviométriques hors du bassin, mais suffisamment proches pour être intéressante) en annexe ; mais comme cela a été déjà mentionné antérieurement, elles ne sont pas utilisées pour la modélisation.

C.3.- Les hypothèses hydrauliques et les bases de calcul

La première hypothèse de calcul relève de l'hydraulique classique : les écoulements suivent les lois établies pour un régime permanent et uniforme. Cette simplification est argumentée par les considérations suivantes :

1. le pas de temps choisi est journalier ;

2. la structure du système hydraulique est de faible extension et sa réponse à des situations transitoires est presque instantanée : distances courtes et pentes fortes ;
3. les données disponibles ne permettent pas d'envisager des situations plus complexes ;
4. l'étude menée est exploratoire et constitue un premier pas dans la recherche d'un outil plus élaboré et généralisé à toute la région.

Dans ce contexte, les équations de Saint-Venant, de continuité et de conservation des moments, sont réduites à leur expression minimum. On n'envisage pas de variations ni spatiales, ni temporelles des caractéristiques de l'écoulements qu'ils soient en charge ou à surface libre.

Pour les captages et leurs conduites respectives, on a utilisé les équations classiques de l'hydraulique, selon le schéma présenté plus loin. Le terme dz (voir fig. 18), qui correspond à la variation de la charge hydraulique sur le seuil du déversoir, est une variable dans l'équation d'énergie établie entre le captage et pression dans la conduite. Une étude de sensibilité sur ce terme dans les condition normale d'opération d'un captage a montré que sa variation a très peu signification dans l'équilibre final de la répartition des débits. Dans le meilleur des cas la variation est de l'ordre de 1 à 2 l/s pour captage d'ESSAN (qui a la plus forte capacité) et de quelques dixièmes de l/s pour les autres captage. On a donc considéré dans la suite comme constants les niveaux d'entrée dans les bassins de mise en charge des captages.

A cause des petites tailles des ouvrages de captage et des volumes d'eau retenus (quelques m^3), on a négligé également les variations des stockages dans ces ouvrages. De même, les variations de débit ou de vitesse pouvant intervenir dans une même journée n'ont pas été prises en compte.

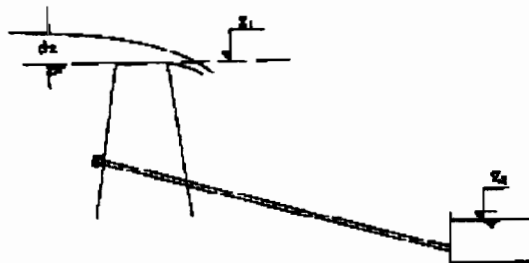


Fig. 18 : Schéma simplifié du captage hydraulique

C.4.- Les hypothèses hydrologiques

Pour la fonction de production, qui transforme la pluie brute (P_b) en pluie nette (P_n), on n'a pas fait appel à une fonction à base physique conceptuelle, car généralement cela nécessite de caler plusieurs paramètres inconnus pour la zone d'étude.

Pour essayer de caractériser l'homogénéité des averses, on a examiné la relation existant entre les stations Linzor et Toconce du bassin et les stations plus proches hors du bassin (El Tatio, Inacaliri, Salado Embalse, Caspana).

A l'échelle annuelle, il existe une très bonne corrélation entre les différentes stations, comme on peut l'observer sur les graphiques en annexe. Cependant, à l'échelle des averses individuelles, cette relation ne présente pas la même qualité, bien qu'elle montre que les

événements sont presque toujours généralisés sur toute la zone observée (au-dessus de 3 000 m d'altitude). On admet souvent dans les bassins de superficie inférieure à 200 km² une distribution homogène des averses importantes. Dans le bassin étudié où la composante orographique est capitale, cette caractéristique n'est pas vérifiée. Le coefficient de corrélation entre Toconce et Linzor est à peu près de 0,6, mais étant donné les problèmes d'installation du pluviomètre dans le village, on admet que cette relation est sous-estimée. En tout cas, c'est une valeur élevée, compte tenu de l'emplacement à l'aval du bassin. Nous avons donc finalement considéré que les observations à la station Linzor étaient représentatives pour tout le bassin versant, en s'appuyant de plus sur la situation centrale de la station dans le bassin.

Pour établir la fonction de production, il faut se référer aux hydrogrammes et aux enregistrements des périodes de crues sélectionnées (en annexe). Lors des épisodes pluvieux, on note qu'il existe un seuil de précipitation en dessous duquel il n'y a pas de ruissellement. Ce seuil est de quelques millimètres. On observe également une dépendance de l'épisode pluvieux antérieur : lors d'événements rapprochés la réponse de l'écoulement est croissante, ce qui s'explique par une augmentation de la teneur en eau du sol. On peut caractériser cet effet par un *indice de précipitations antérieures* (IPA), introduit pour la première fois par Kohler & Linsley (1951). Après Kohler, d'autres indices de ce type ont été proposés, et on s'est proposé d'utiliser dans notre mémoire l'indice défini par Chevallier (1983), sur la base des résultats de nombreuses études réalisées par l'ORSTOM en Afrique et appliqué avec succès en zones semi-arides :

$$IPA_i = (IPA_{i-1} + P_{i-1}) e^{-\alpha}$$

où, API_i : est l'indice de la précipitation d'occurrence i ;
 P_i : le volume de la précipitation i ;
 t : la durée séparant la précipitation i de la précipitation $i-1$;
 α : une constante.

Cependant le calcul d'IPA sur la base des observations du bassin de Toconce n'est pas facile à cause de la grande irrégularité en temps et intensité des averses. Finalement, nous avons adopté une fonction de production de type linéaire de la forme :

$$P_n = (A_1 IPA + A_2) \times P_b - A_3 P_I$$

où A_1 , A_2 et A_3 sont des paramètres à identifier avec les contraintes A_1 et A_2 inférieurs à 1, A_3 toujours plus grand que zéro et que $P_n \leq P_b$. Etant P_I le seuil de l'infiltration, fixé arbitrairement pour l'instant, A_3 peut être une fonction variable dans le temps, laquelle avec les paramètres A_1 et A_2 permettent établir une fonction que, en considérant l'humectation du sol, soit modulable en fonction des averses antérieures.

En ce qui concerne la fonction de transfert pluie nette / débit, le problème est plus difficile. Comme :

1. l'objectif affiché est plus la maîtrise de la gestion de la ressource en eau que la compréhension des phénomènes naturels,
 2. les données disponibles sont réduites,
- la fonction de transfert adoptée doit avoir une expression simple et être d'application facile.

Cependant une telle fonction ne pourra pas représenter de façon satisfaisante l'irrégularité des averses et des crues générées. C'est pour cela qu'en première approche, la modélisation ne sera appliquée que sur une ou deux séquences pluie débit pour y caler les paramètres du modèle.

Le choix des séquences est pratiquement imposé par les données disponibles. Pour la fonction de transfert, on a adopté deux formes : une fonction de type exponentiel et une fonction de type quadratique, qui peuvent représenter de manière acceptable les courbes de montée et de décrue d'un hydrogramme.

Les débits résultants de l'application de ces fonctions à chacun des sous-bassins sont de la forme :

$$Q_i = Q_{bi} + Q_{si}$$

avec :

- i = indice pour identifier le sous-bassin, $i = 1, 2, 3, 4, 5$.
- Q_i = débit total du sous-bassin
- Q_{bi} = débit de base, associé aux apports souterrains
- Q_{si} = débit superficiel, associé au ruissellement produit par la pluie nette.

Pour évaluer le débit de base, il faut se rapporter aux hydrogrammes annuels. On peut observer que les débits pendant les périodes sans pluie (la majeure partie de l'année) sont pratiquement constants. Les débits de bases en entrée au système hydraulique seront donc considérés comme constants et la seule équation à appliquer est celle de continuité. Mais dans la réalité, il n'y a pas de contrôle de ces débits et les seules observations disponibles sont les rares jaugeages fait depuis 20 ans.

Pour confirmer ou modifier les valeurs résultant de l'analyse des données existantes, une campagne de jaugeages a été réalisée sur les sources captées et un certain nombre de points intermédiaires des cours d'eau. Les mesures ont été faites avec un micromolinet OTT C2 avec suffisamment de points par section pour limiter les erreurs sur le calcul du débit. Les résultats de cette campagne ont confirmé les valeurs de l'analyse des données anciennes et ont apporté de nouvelles informations — mais quelques nouvelles questions — sur ce qui passe dans les zones intermédiaires du bassin.

Le débit superficiel peut s'exprimer sous la forme :

$$Q_{si} = Pn S_{bi} f$$

avec :

- S_{bi} = superficie du sous-bassin
- f = fonction de production à identifier

Finalement, le débit résultant doit être :

$$Q_T = \Sigma (Q_{bi} + Q_{si}) - Q_{ext} = Q_{DGA}$$

avec :

- Q_T = le débit total simulé à station de mesure à l'exutoire du bassin d'étude
- Q_{ext} = les extractions vers hors du bassin et pas mesure à l'exutoire
- Q_{DGA} = le débit observé et enregistré à la station de mesure (aussi nommé Q_o).

Par comparaison entre Q_o et Q_T , on trouve les fonctions et les valeurs de paramètres cherchés ; c'est *calage* du modèle.

C.5.- Le schéma du modèle et les valeurs d'entrée

Pour construire sous VENSIM® le modèle à utiliser, on a adopté une structure sur la base de modules individuels (correspondants à chaque ouvrage), connectés entre eux par le

biais le réseau naturel ou artificiel existant. Ce type d'approche permet d'arriver plus vite à la définition de la structure complète puisqu'elle permet de définir indépendamment les fonctions et les paramètres propres à chaque module, puis avec l'assemblage de tous les ouvrages, de trouver les paramètres restants.

La figure 19 montre le schéma général d'un module individuel comportant un captage, une ou deux conduites qui en sortent, contrôlés par des vannes, et le déversoir qui laisse passer l'eau non capté vers le lit naturel du cours d'eau. Le paramètre QL correspond à la capacité nominale du captage et à la valeur maximale acceptée par les conduites. Avec les vannes ou contrôles (CTRL 1, CTRL 2 sur le schéma), permettent les simulations de fonctionnement, mais aussi le calage des paramètres qui défissent les fonctions du captage.

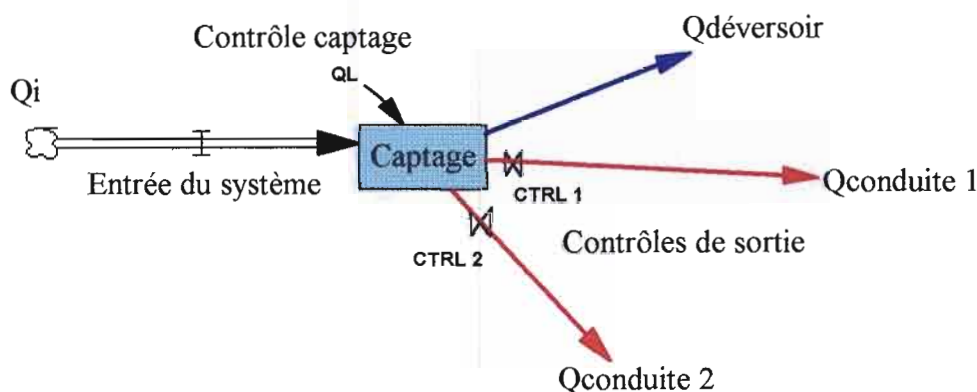


Fig 19 : représentation symbolique d'un captage sous VENSIM®

Le schéma général du système Toconce sous VENSIM®, rassemblant tous les modules, est présenté dans la Figure 25 . La nomenclature utilisée est la suivante :

- C1 = captage de Piedras Grandes pour la microcentrale de CODELCO
- C2 = captage de Piedras Grandes pour déviation vers la rivière Toconce
- C3 = captage du sous-système Linzor
- C4 = captage du río Toconce pour la microcentrale de Toconce
- C5 = captage du río Toconce par ESSAN
- C6 = prise d'eau d'irrigation du périmètre *Toconce* sur la conduite d'ESSAN
- CR i = captages les petits périmètres irrigués ;
 - i = 1 : périmètre *El Potrero*
 - i = 2 : périmètre *Media Quebrada*
 - i = 3 : périmètre *Patillón*
- T1 = microcentrale de Piedras Grandes (CODELCO)
- T2 = microcentrale de Toconce
- Q1 = débit d'entrée à Piedras Grandes
- Q2 = débit d'entrée à Linzor
- Q3 = débit d'entrée à Toconce
- Q4 = débit des apports latéraux au río Toconce, entre Piedras Grandes / Linzor et le 1^{er} captage d'irrigation.
- Q5 = débit des apports latéraux au río Toconce entre le dernier captage pour l'irrigation et le captage de la microcentrale de Toconce
- Qi, avec i = 6, ... , 27 : débits intermédiaires dans tout le système
- CTRL i = vannes de contrôle des conduites ; i = 1, 2, ..., 5.
- QL i = capacité nominale des captages ; i = 1, 2, ..., 6.

DGA Q = point de contrôle des débits observés

Pour les valeurs adoptées pour les débits de base des cinq zones contributives ainsi que les superficies des bassins versants correspondants (voir fig. 24) sont les suivantes :

$$Q_{b1} = 70 \text{ l/s} ; S_{b1} = 12,7 \text{ km}^2$$

$$Q_{b2} = 165 \text{ l/s} ; S_{b2} = 43,2 \text{ km}^2$$

$$Q_{b3} = 230 \text{ l/s} ; S_{b3} = 47,1 \text{ km}^2$$

$$Q_{b4} = 25 \text{ l/s} ; S_{b4} = 43,9 \text{ km}^2$$

$$Q_{b5} = 5 \text{ l/s} ; S_{b5} = 27,1 \text{ km}^2$$

Pour le valeur de P_I , seuil d'infiltration, nous avons adopté 5 mm.

Pour les paramètres de contrôle, les valeurs actuellement admise en fonctionnement opérationnel de routine sont les suivantes :

$$\text{CTRL 1} = \text{CTRL 2} = \text{CTRL 4} = 1$$

$$\text{CTRL 3} = 0$$

$$\text{CTRL 5} = 0,1666 \text{ pour représenter les 4 heures d'opération journalière}$$

$$\text{QL1} = \text{QL3} = 50 \text{ l/s}$$

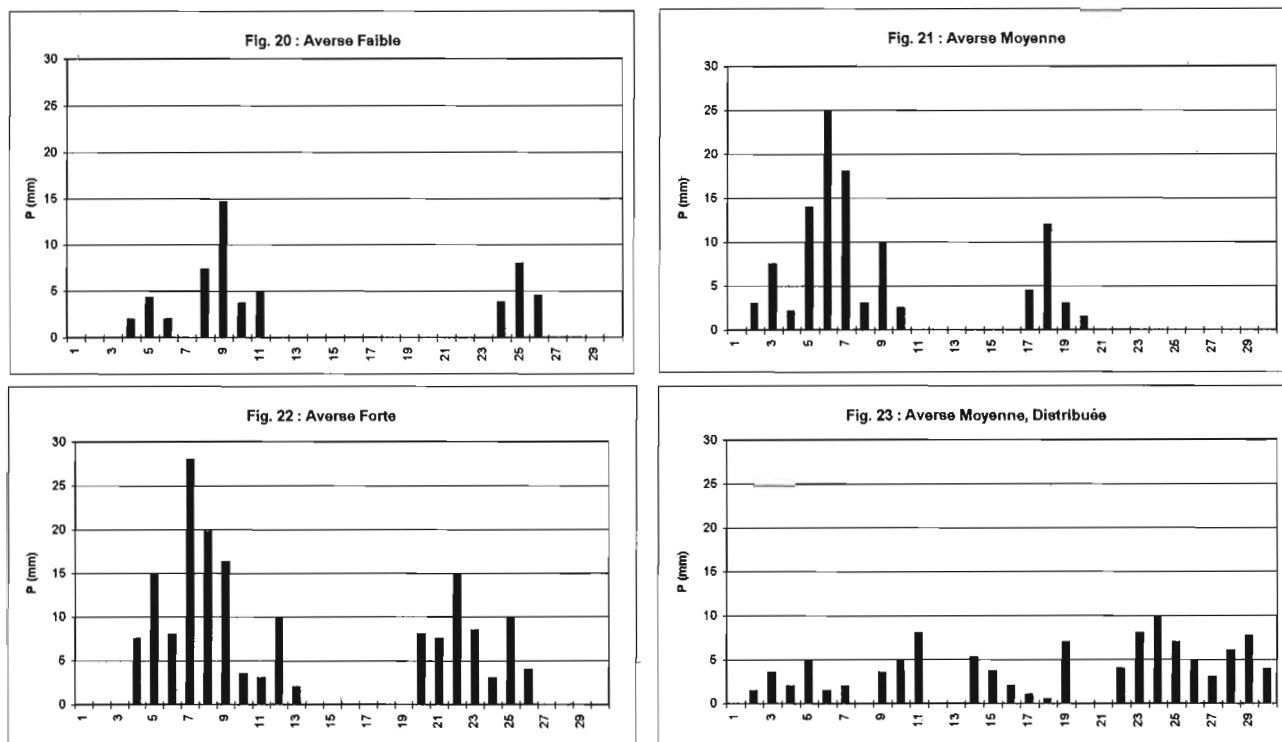
$$\text{QL2} = 130 \text{ l/s}$$

$$\text{QL4} = 300 \text{ l/s}$$

$$\text{QL5} = 525 \text{ l/s}$$

$$\text{QL6} = 25 \text{ l/s}$$

Après le calage du modèle, des simulations ont été opérées avec 4 types d'averses de différentes intensités, générées sur la base des 20 années d'observation. Ces averses type sont présentées dans les figures 20 à 23.



Figs. 20 à 23 : Hystogramme des précipitations pour les simulations.

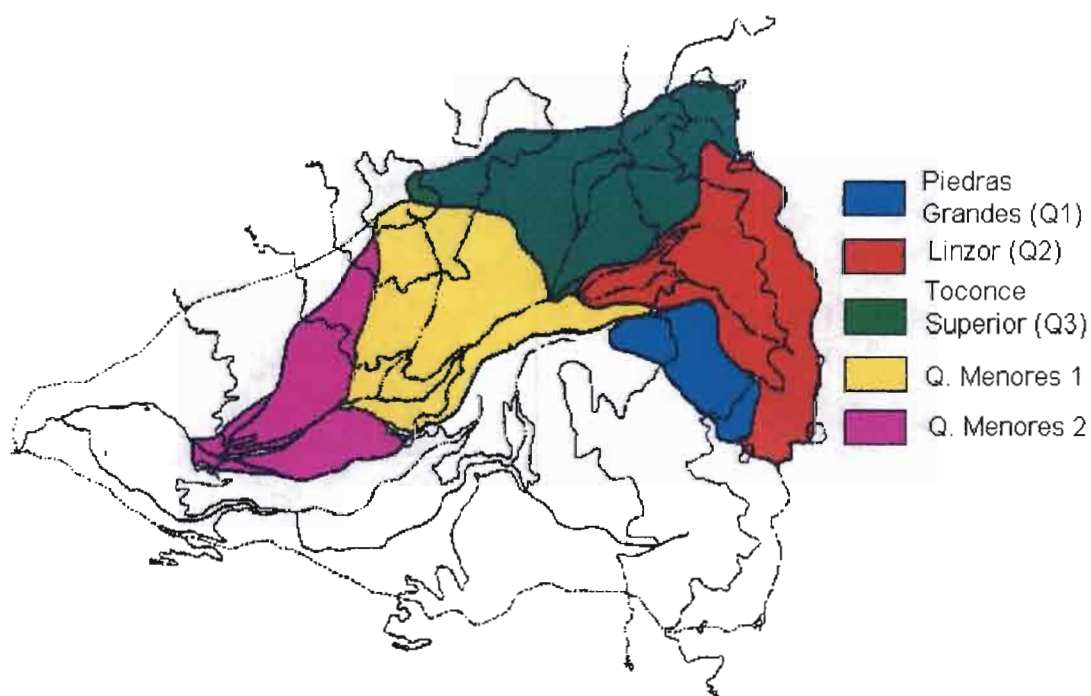


Fig. 24 : Situacion des sub-bassins du bassin de Toconce.

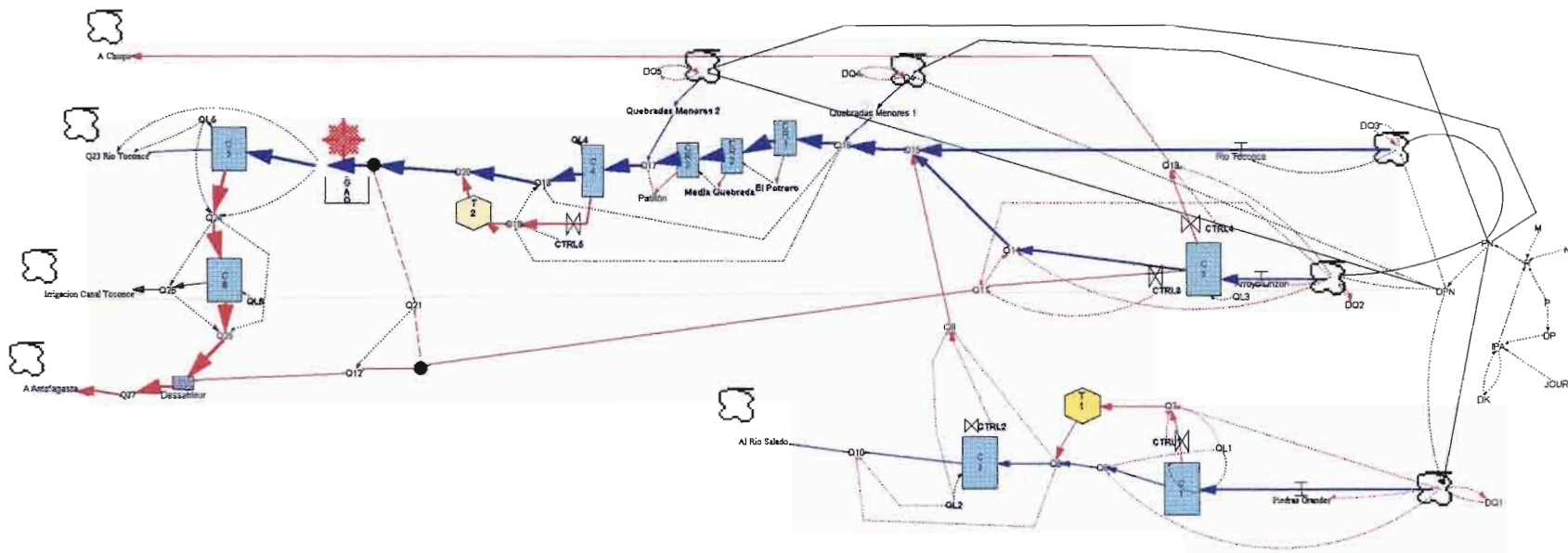


Fig. 25 : Schéma général du modèle du bassin versant Toconce, construit avec VENSIM®.

D - LES RESULTATS

D.1.- Introduction

Les résultats de la modélisation appliquée au bassin versant de Toconce sont discutés dans ce chapitre. Ils comprennent, d'une part, la détermination des fonctions et paramètres des différents modules opérationnels, qui constitue la phase de *calage* et de la *validation*, et, d'autre part, une phase de *simulation* de quelques situations opérationnelles intéressantes. Pour le franchissement de ces étapes, deux questions se sont posées:

- Est-il possible de trouver des fonctions simplifiées pour caractériser des phénomènes dont le moins que l'on puisse dire est qu'ils sont irrégulières?
- Sur quels leviers peut-on agir et quelles sont les connaissances qu'il faut approfondir pour améliorer les résultats obtenus?

Pour la partie hydraulique, la plus déterministe, la réponse à ces questions est relativement facile. Mais la mise en oeuvre du modèle et l'analyse des résultats appellent de nouvelles observations dont il faudra tenir compte dans l'élaboration d'une modélisation d'envergure régionale.

Pour la partie hydrologique, la réponse aux deux questions en appelle une troisième: avec combien de paramètres caractérisant chacune des fonctions recherchées veut-on ou doit-on travailler?. Il est reconnu que pour les crues, plus il y a de paramètres, meilleure est la représentation, mais aussi il est plus difficile le calage et validation. De toute manière, il y a une limite supérieure au nombre de paramètres au-delà de laquelle tout accroissement est plus une gêne qu'une aide, qui conduit souvent à des résultats décevants. Dans cette étude, le nombre de paramètres a été limité à maximum trois par fonction, à cause de la faiblesse des échantillons observés disponibles ; quelques essais avec des fonctions un peu plus complexes n'ont guère amélioré les résultats.

La première section de ce chapitre est relative aux problèmes de calage et de validation des fonctions, en comparant les performances respectives des deux fonctions transferts utilisées.

La deuxième section présente des résultats de simulation.

D.2.- Les problèmes de calage et validation

Cette question concerne surtout la partie hydrologique, puisque la partie hydraulique contient un échantillon réduit de paramètres dont les valeurs sont complètement déterminées par les lois de l'écoulement.

Dans le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants, les caractéristiques des sols jouent un rôle prépondérant. Dans notre milieu, l'absence d'information sur le fonctionnement hydrodynamique des couvertures pédologiques du bassin ne permet pas d'élaborer une fonction de production en accord avec les différents types d'averses qui se produisent dans la zone. Le problème de la relation entre l'état d'humectation du sol préalablement à une pluie et la réponse du bassin, n'a pas de solution directe bien que les observations montrent la pertinence d'une prise en considération de ces processus. Sans

aucune indication sur le type et la forme de la fonction de production qu'il faut adopter, on se satisfera d'une relation basée sur l'indice de précipitations antérieures. Les seules conditions que l'on s'impose sont :

- $P_n < P_b$, ce qui revient à imposer que le volume ruisselé (en sus de l'écoulement de base) est inférieur au volume précipité ;
- Les pertes par infiltration doivent être raisonnablement importantes pour les averses faibles et plus faibles pour les averses fortes.

Ces contraintes peuvent paraître difficile à résoudre avec une fonction linéaire, mais, avec l'introduction du paramètre P_I associé à une valeur initiale de référence pour la pluie d'infiltration, les résultats obtenus dans notre application sont satisfaisants.

Malgré la limitation introduite par ce paramètre au domaine de validité de la fonction à des valeurs de précipitations supérieures au seuil fixé pour P_I (voir le paragraphe C.5 ; nous avons adopté la valeur de $P_I = 5$ mm), la fonction présente un comportement plus performant avec lui que sans lui.

La première condition est respectée pratiquement dans tous les cas, sauf un. Cette exception correspond à une précipitation moyenne, 11 mm, mais qui vient tout de suite après deux jours de fortes pluies (30 et 45 mm respectivement) consécutifs à une période sèche. Cela induit une valeur élevée d'IPA et la correction par le paramètre P_I est faible. On peut logiquement penser à un report des écoulements des jours précédents sur le suivant, mais comme il s'agit du seul cas parmi toutes les périodes sélectionnées, c'est plutôt un problème de calage des paramètres. Il faut noter également que ces cumuls journaliers sont historiquement les plus élevés.

Le calcul de l'indice d'humectation par une méthode différente — comme celle de Köhler — que celle adoptée initialement ne paraît pas améliorer la performance du modèle. Dans l'annexe, on peut trouver pour l'année 1984, une comparaison de la performance des indices choisis (IPA Ch) et celui de Köhler (IPA Ko). Les réponses sont très similaires aux averses de la période étudiée.

Pour la deuxième condition, le résultat est moins performant, mais néanmoins satisfaisant. L'introduction du seuil P_I est un facteur important, probablement fondamental. Toutes les averses faibles, au-dessous de 5 mm, ne produisent pas de ruissellement et elles ne sont pas prises en compte. En terme de bilan hydrologique, elles peuvent être assimilées à de l'infiltration ou à de l'évaporation.

Mais l'introduction de la constante P_I n'est pas suffisante. Il faut réduire les débits en fonction de l'humidité liée aux précipitations antérieures, à l'occasion des averses fortes. Pour cela, nous avons construit une fonction qui tempère l'effet de P_I selon le nombre de jours précédents avec des événements pluvieux. Deux paramètres auxiliaires ont été définis : n , le nombre de jours pluvieux consécutifs, et m le nombre de jours consécutifs avec des pluies supérieures à P_I . Ainsi, le comportement de la fonction est plus complexe mais très performant. Des averses journalières de même volume ont des réponses différentes selon qu'elles interviennent après une période sèche, où la réduction est forte, ou qu'elles font suite à une séquence humide où la réduction est faible.

Après diverses tentatives pour caler les paramètres, nous avons retenu les valeurs qui nous paraissent les plus satisfaisantes. Faute de données suffisantes pour une véritable validation, les valeurs suivants ont été adoptées :

$$A_1 = 0,009$$

$$A_2 = 0,7$$

$$A_3 = \frac{2}{(m+1)^n}$$

et la fonction devient :

$$P_n = Pb(0,009IPA + 0,7) - \frac{10}{(m+1)^n}$$

avec P_n , P_b et IPA en mm/jour.

Un facteur important n'a pas été pris en compte, la variabilité spatiale de la pluie ; mais avec un seul poste de mesure fiable sur le bassin — implanté au captage de Linzor au seul endroit à l'intérieur du bassin où il y a une présence humaine permanente —, il est impossible de considérer cet effet. Dans le futur, l'installation d'autres postes pluviométriques pourrait pallier à cet inconvénient ; mais ce complément d'appareillage est peu probable au vu des conditions de manutention (climat inhospitalier, altitudes comprises entre 3 500 et 5 500 m, population très réduite et concentrée à l'aval du bassin, voies d'accès nécessitant des véhicules spécialement adaptés, éloignement de villes importantes, etc.).

Pour la fonction transfert, deux formulations de fonction ont été testées : une expression quadratique et une expression exponentielle.

Avec la forme quadratique, après des essais avec des équations d'ordre 4 à 6, qui n'apportaient aucune amélioration notable, nous nous sommes contentés d'équations d'ordre 2 et le résultat le plus satisfaisant a été obtenu avec l'expression :

$$Q_s = \frac{S_b}{86,4} (0,001P_n^2 + 0,01P_n)$$

avec :

Q_s = débit superficiel du bassin ou sous-bassin, en m³/s

S_b = superficie du bassin ou sous-bassin, en km²

P_n = pluie nette, résultant de la fonction de production, en mm/jour.

Cette forme donne des résultats satisfaisants bien que les crues soient un peu surestimées en débit de pointe et sous-estimées en durée (fig. 26). Dans la même figure on s'aperçoit qu'il y a certains problèmes avec les crues irrégulières. De plus le tarissement entre deux averses est abrupte, comme par exemple en 1991 (voir fig. 27) où il y a une petite averses entre les deux événements principaux. On note également cette même année que le modèle génère une crue qui n'a pas été observée. Cependant les valeurs maximales sont tout à fait acceptable, comme on peut l'observer sur les figures 26 à 31, qui montrent le calage et la validation du modèle sur les périodes choisies.

Avec la forme exponentielle, le problème a été résolu d'une manière plus satisfaisante. Le meilleur résultat a été obtenu avec une fonction qui prend en compte la pluie du jour, mais aussi le débit et la pluie du jour antérieur :

$$Q_s = \frac{S_b}{2000} (P_n + P_{n-1}) e^{0,01Q_{t-1}-1,2}$$

avec :

Q_{i-1} = débit superficiel calculé du bassin, pour le jour précédent, en m^3/s
 P_{n-1} = pluie nette du jour précédent, en mm/jour
 Q_s, S_b, P_n ont la même signification que dans l'expression quadratique.

En se reportant aux figures présentées ci-après, on s'aperçoit que dans la plupart des cas la fonction exponentielle répond bien, sensiblement mieux que la fonction quadratique. Pour les averses fortes, les valeurs obtenues sont plus faibles et plus proches de la réalité. En face des averses irrégulières ou pour la génération des crues non observées, on retrouve les mêmes problèmes qu'avec la forme quadratique. Cependant, l'allure générale est plus *hydrologique*, avec des courbes de décrue et de tarissement entre les épisodes plus conformes à la réalité.

Il n'est pas facile d'élucider le problème, mais il est hautement probable que l'état d'humectation du sol joue un rôle important. On s'aperçoit également sur la bases des observations irrégulières dont on dispose, qu'il y a au moins trois facteurs intercorrélés : l'intensité et la durée des averses, ainsi que la durée qui les séparent.

Au cours de l'année 1985, on peut observer une première crue forte, mais de courte durée. Les premiers deux jours on a enregistré les épisodes sans doute les plus intenses depuis l'installation de la station. La crue générée est moyenne. Après une période sans pluies, arrive une autre séquence de quatre jours pluvieux, le dernier avec l'épisode le plus fort, mais inférieur à ceux de la première séquence. La crue générée dans ce cas est beaucoup plus grande que la première. On peut penser que la première averse a provoqué une saturation du sol et un emmagasinement important qui n'a pas été totalement estompé avant la deuxième averse. Avec cette hypothèse l'hydrogramme modélisé de 1991 devrait montrer un comportement différent de celui observé avec une crue à partir du sixième jour de précipitation significative seulement, et se conformer au résultat de la modélisation !

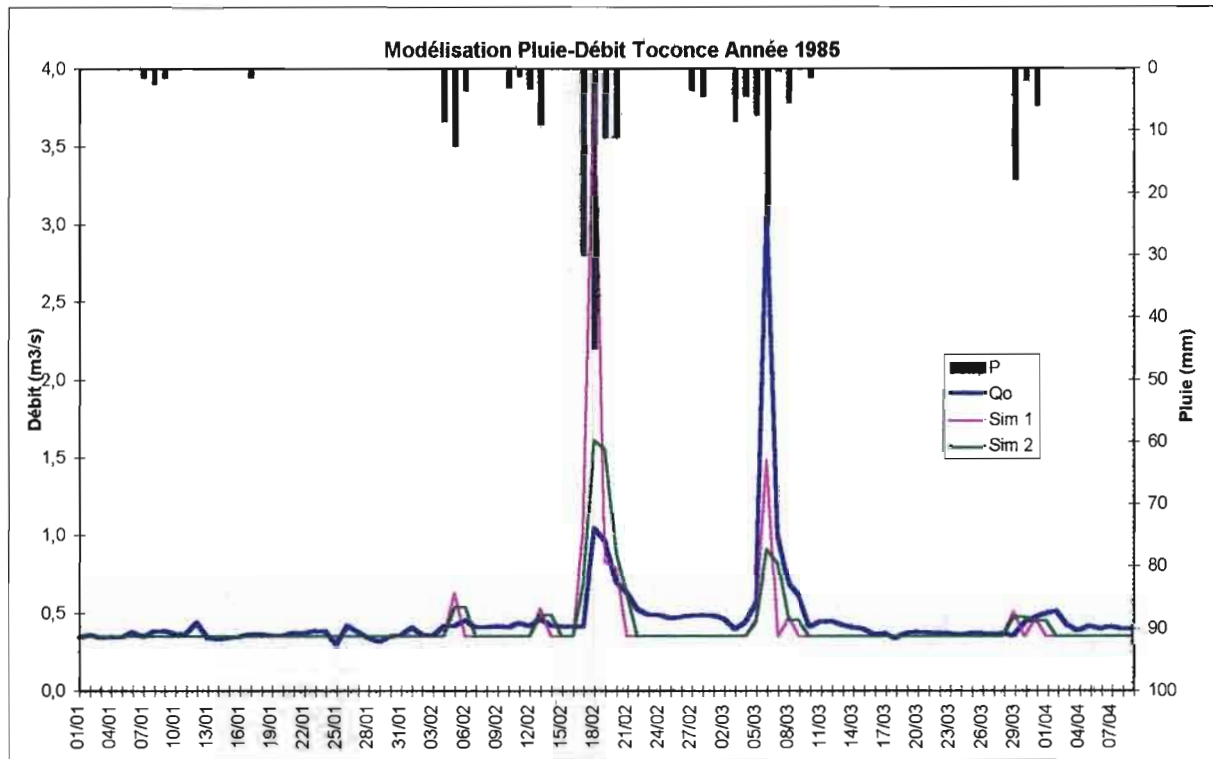


Fig. 26 : Calage du modèle avec le période jan. à avr '85.

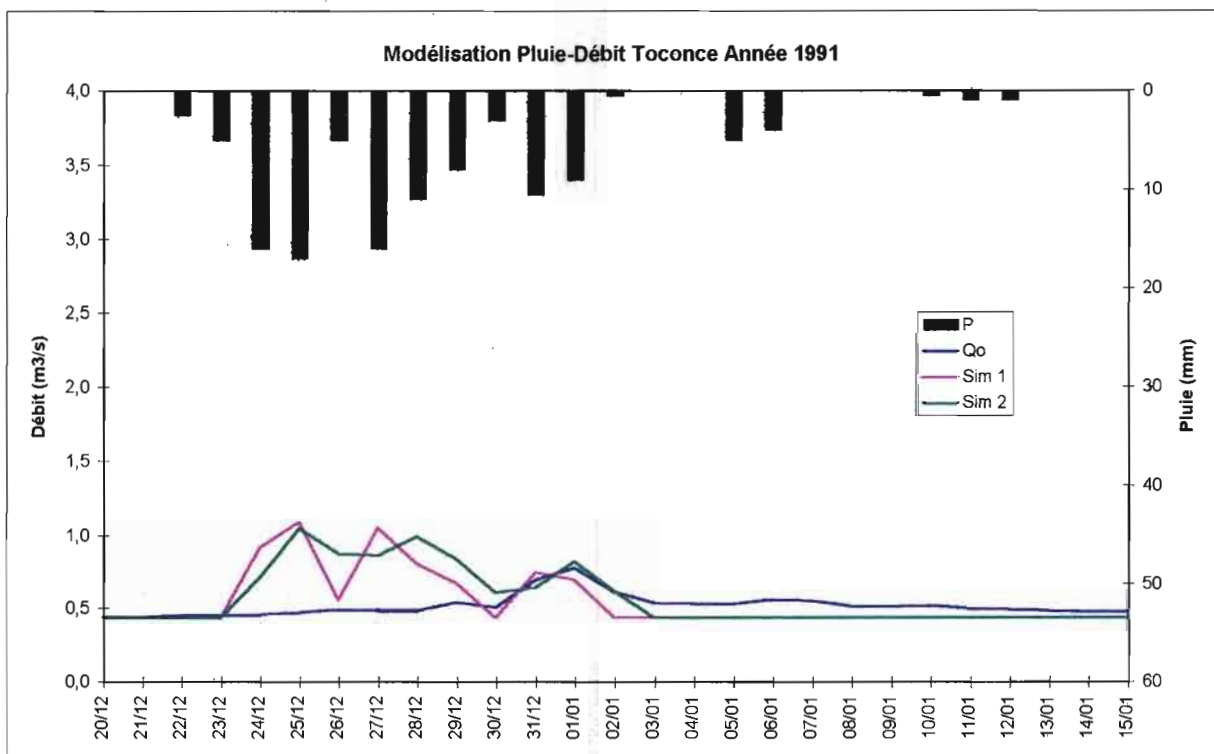


Fig. 27 : Calage du modèle avec le période dec '90 à jan '91.

Les autres périodes sélectionnées (figs. 28 à 31), ne permettent pas de clarifier la situation, car elles possèdent des lacunes importantes, quelques unes coïncidant avec l'observation de très fortes précipitations.

Dans les deux cas, on peut encore attribuer cette contre-performance du modèle aux précipitations mesurées à l'unique poste de Linzor qui n'a pas de raison d'être représentatif de ce qui se passe à l'exutoire du bassin ou dans certains sous-bassin. Dans la réalité, il est probable que la réponse hydrologique du bassin soit à la fois plus simple et plus complexe que tout cela. L'écoulement pourrait ne provenir que de surfaces saturées de bas-fond avec des nappes lenticulaires plus ou moins affleurantes ou de bas de versant. Dans une tentative de caractériser la situation où l'humidité permanente dans le bas-fond modifierait la rugosité de la surface d'écoulement, on a essayé d'introduire dans la fonction de transfert le paramètre IPA. Les résultats sont encore moins satisfaisants.

On revient donc au problème central, celui de l'existence d'un seul poste pluviométrique pour caractériser la pluie. A ce propos, on doit insister sur la nécessité de mesures de terrain pour mieux caler les différents paramètres adoptés, surtout celui concernant l'humectation du sol (nous avons adopté $\alpha = 0,5$ pour l'indice des précipitations antérieures, valeur utilisée dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique). Il faudrait tenter aussi d'appliquer d'autres expressions de l'infiltration et autres fonctions de productions utilisées en hydrologie (Ribstein, 1990). Mais est-ce possible dans ce contexte si particulier de l'Altiplano chilien où les propriétés hydrodynamiques des sols et en particulier des premiers centimètres sont totalement inconnues ?.

On a essayé de prendre en compte l'écart entre le centre de gravité des périodes pluvieuses et la valeur maximum de la crue (*lag time* des anglo-saxons), sans aucun résultat satisfaisant, cet écart existant dans certains cas et pas dans d'autres (à l'exemple des crues de 1985).

En laissant de côté les problèmes qui ont été soulevés précédemment, la modélisation a généralement bien répondu aux données, y compris dans les périodes où l'alternance de lacunes et d'observations conduit à ce que l'on peut, sans prendre trop de libertés, qualifier de *validation*. C'est donc la forme exponentielle que nous avons conservée pour la dernière étape de simulation de situations caractéristiques.

Cette approche montre qu'il est possible de réaliser sur un bassin versant de taille moyenne au travers de l'outil VENSIM® une modélisation conjointe des questions hydrauliques et hydrologiques, dans un objectif de gestion des ressources hydriques. On s'aperçoit qu'il y a des aspects à améliorer ; mais dans un contexte exploratoire, le modèle est acceptable.

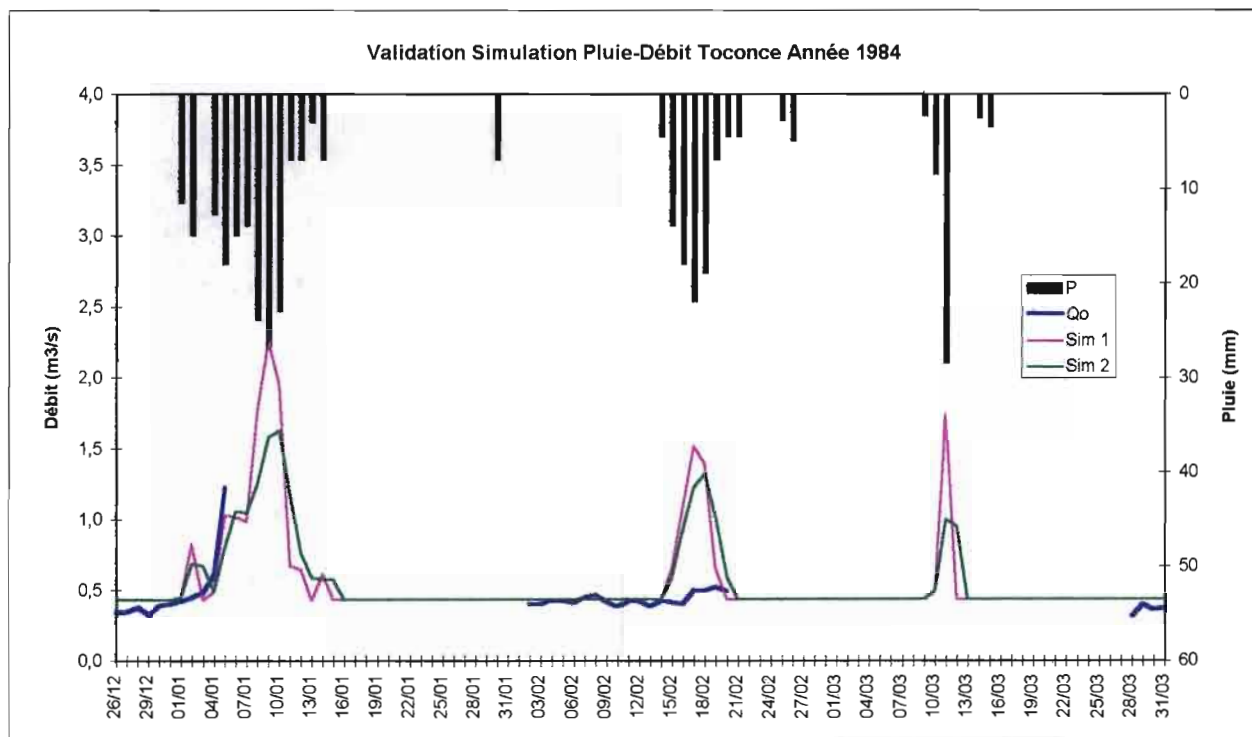


Fig. 28 : Validation du modèle avec le période dec '83 à mar '84.

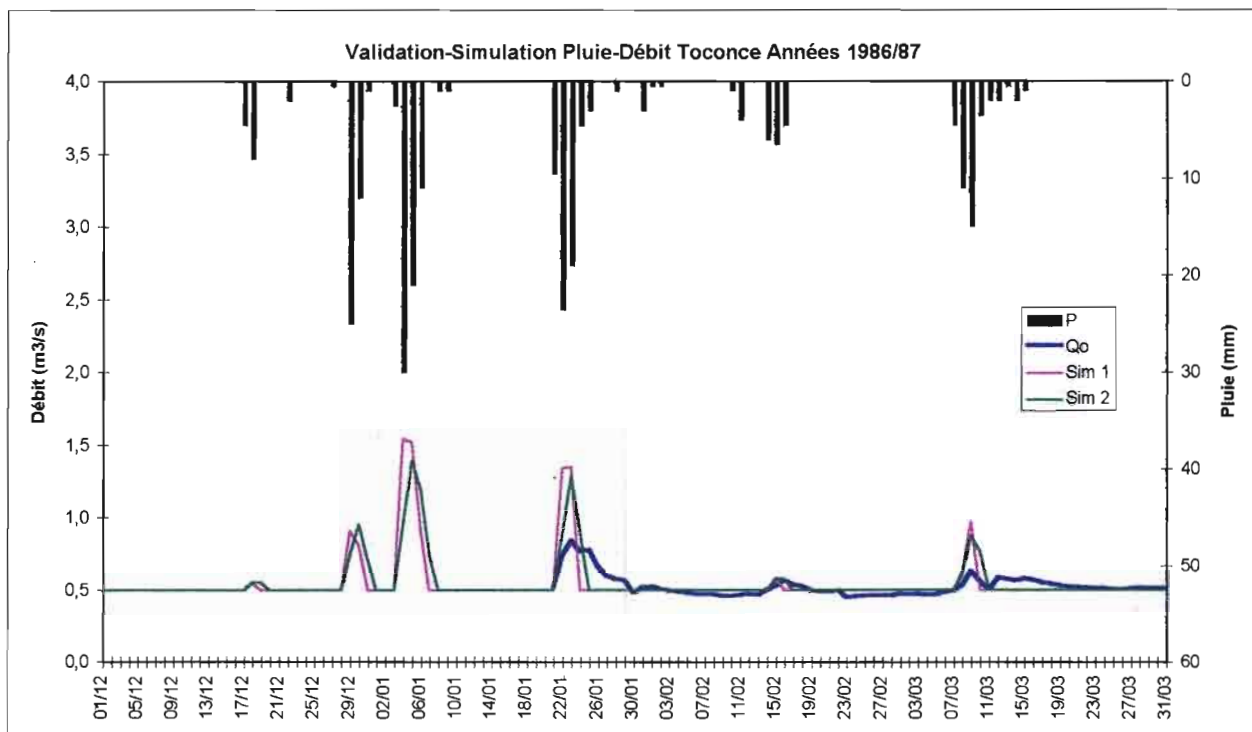


Fig. 29 : Validation du modèle avec le période dec '86 à mar '87.

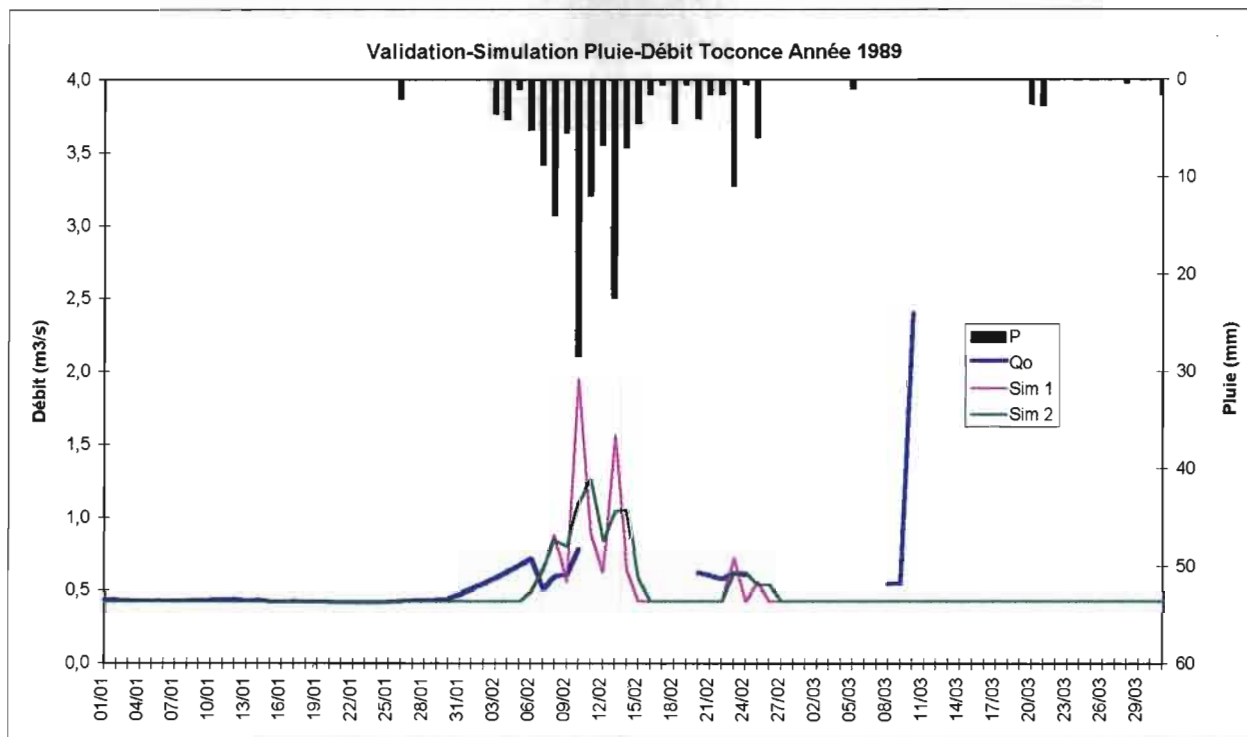


Fig. 30 : Validation du modèle avec le période jan à mar '89.

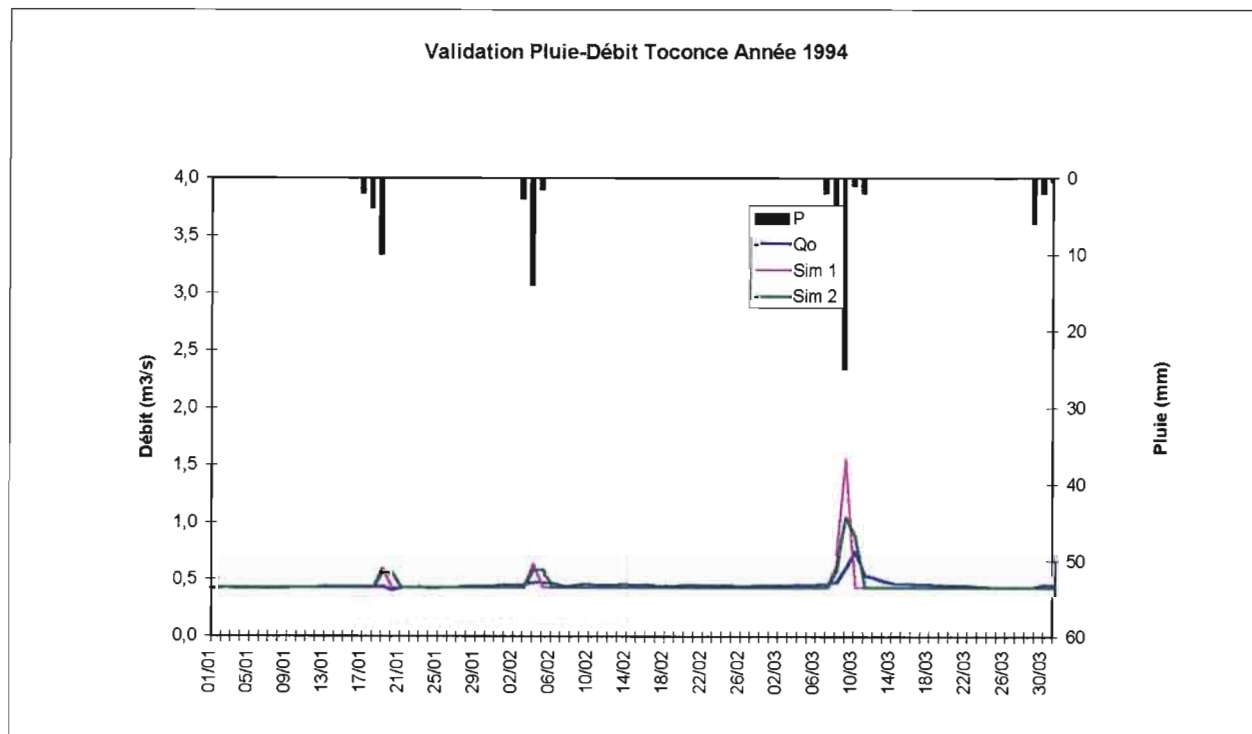


Fig. 31 : Validation du modèle avec le période jan à mar '94.

D.3.- La Simulation

De fait des simulations ont déjà été présentées sur quelques périodes présentant des lacunes d'observation lors de la phase de calage du modèle. Cependant, une simulation plus intéressante peut être réalisée avec des averses fictives.

La modélisation hydraulique dépend de la modélisation hydrologique. La modélisation sur la base de données d'observations peu nombreuses est limitée ; les résultats obtenus ne sont pas suffisamment variés pour évaluer les comportements propres des différents éléments composants le *système Toconce*. Ainsi par exemple, le comportement des variables Q15, Q16, Q17, Q20, pour en citer quelques une dans le tronçon principal du río Toconce, est très similaire. Dans les conditions choisies pour le calage du modèle, tous les sous-bassins réagissent de la même manière à une averse uniformément distribuée : les différences observées ne concernent que les volumes et n'intéressent pas la dynamique du transfert.

Cependant le modèle construit sous VENSIM® possède tous les contrôles pour appliquer des paramétrisations des fonctions de production et de transfert différentes à chaque entrée du système. Avec les paramètres $CTRL_i$, les variables d'entrée Q_i ($i = 1$ à 5) et les variables caractéristiques des sous-bassins et sous-systèmes (*Quebradas Menores 1 et 2, Río Toconce, Piedras Grandes et Arroyo Linzor*), de nombreuses combinaisons et simulations sont possibles : on peut estimer l'effet du tarissement complet d'une source (par exemple Linzor), la réduction du débit de base d'une autre (par exemple Toconce), d'un accident sur le réseau de conduite (par exemple rupture de l'adduction Codelco entraînant la fermeture du captage de Linzor), etc..

Malgré ses limitations déjà amplement commentées, le modèle hydrologique s'adapte assez bien aux contingences du milieu. En situation de crue, il permet la partition entre ce qui passe dans le réseau hydrographique naturel et ce qui est capté dans le réseau de conduites existant, comme on peut le vérifier sur quelques situations fictives présentées graphiquement à la fin de ce chapitre.

Pour la *simulation 1*, on opère avec deux averses identifiées comme *faibles* : l'ensemble des fonctions de production et de transfert génère deux crues, l'une d'elles étant très petite. L'intervalle entre les deux averses est suffisamment grand pour rendre indépendant les deux phénomènes, ce qui est représenté fidèlement par le modèle. Les valeurs résultantes pour les entrées du système sont faibles. A Piedras Grandes par exemple, la limite de capacité de la conduite de transfert vers la rivière Toconce n'est pas dépassée . Tout est transféré au tronçon central du bassin, jusqu'au captage d'ESSAN où, se produit le partage entre un déversement dans le lit naturel (Q23 vers) et un captage de tout ce qui est possible.

Dans la *simulation 2*, on opère toujours avec deux averses, dont l'une est *moyenne* ; il se produit encore deux crues, mais plus irrégulières et proches entre elles. L'intervalle entre les deux averses est de six jours seulement, avec une influence de la première crue sur la deuxième, bien représentée par le modèle.

La *simulation 3* correspond à la réponse du modèle à une séquence qualifiée de *forte*, caractérisée par un épisode pluvieux long et forte, suivi quelque jours après par

autre épisode *moyen*. On observe deux crues importantes et proches dans le temps. Aux divers points intermédiaires, le système hydraulique partage les débits en accord avec la capacité des conduites et/ou des captages. Ces limites ne sont jamais dépassées, comme dans toutes les simulations réalisées et comme dans la réalité.

La *simulation 4* est un cas atypique, avec beaucoup de jours pluvieux mais de faibles valeurs. Le modèle produit un « état de crue permanent », mais de débit relativement faible. Les débits sont irréguliers partout, y compris dans les conduites sans tenir compte de leurs limitations de capacité.

D'autres simulations ont été réalisées, avec diverses alternatives opérationnelles en jouant sur les paramètres *CTRL* et les variables de contrôle d'entrée, identifiées par des noms (*Piedras Grandes, Linzor, ...*), mais les résultats, à cause de l'utilisation de fonctions de production et de transfert uniques pour tout le bassin, ne diffèrent pas beaucoup de ceux déjà présentés dans ce mémoire. Tant qu'il n'existe pas de fonctions propres pour chaque sous-bassin, la situation la plus intéressante concerne des « supposées » périodes d'étiages.

Pour une généralisation à une zone plus étendue, il faudra incorporer au modèle deux nouvelles compétences qui concernent :

- d'une part, les réseaux d'irrigation ; à Toconce, les canalisations des périmètres d'irrigation sont courtes avec une organisation simple, mais dans autres zones, comme à San Pedro de Atacama ou à Lasana, les surfaces agricoles irriguées sont beaucoup plus vastes avec une organisation complexe (structure et gestion) des canaux.
- d'autre part, la mise en place de dispositifs de sécurité sur les différents captages : sur le captage d'ESSAN (Toconce), lorsque la crue est supérieure à 4 ou 5 m³/s, le captage est fermé et toute la crue passe dans le cours d'eau naturel. Dans notre modèle, ce protocole de sécurité de Toconce a été testé avec succès et sans difficulté en opérant sur la variable de contrôle *CTRL* ; mais il doit être adapté aux normes de gestion de chaque captage qui ne sont pas connues pour les autres situations et le cas d'une crue généralisée où tous les captages seraient en *mode protégé* n'a pas été testé.

D.4.- Perspectives

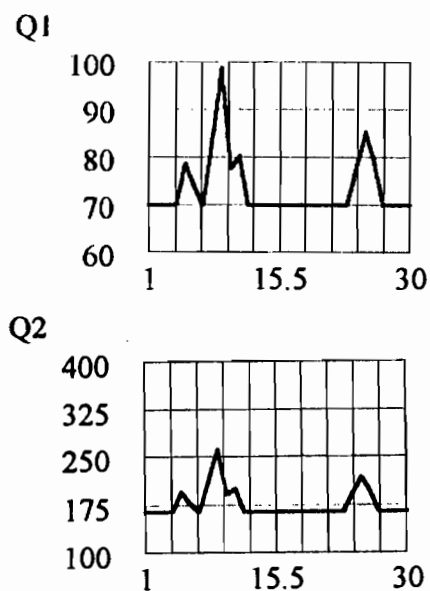
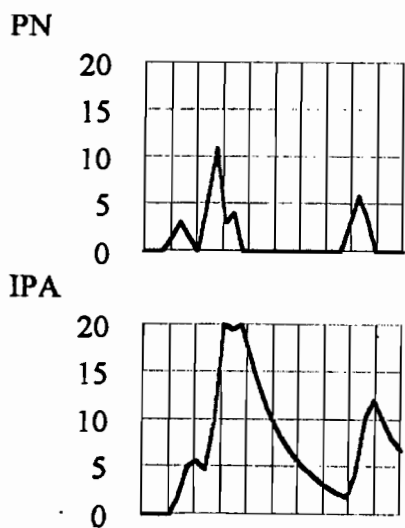
Il est nécessaire d'améliorer la définition de la fonction de production et de trouver, parmi les innombrables formulations que propose la littérature hydrologique, celles qui s'adaptent aux caractéristiques particulières de notre région. Entre autre, il faut essayer de caler une fonction qui prend compte la capacité d'absorption du sol, en adaptant éventuellement aux conditions locales, l'une ou l'autre des méthodes utilisées dans d'autres pays. La rétention dans la zone non saturée est également à considérer peut-être à travers la caractérisation des états de surface. Il paraît possible, par exemple, d'appliquer à notre région la fonction du Soil Conservation Service ; mais elle nécessite la détermination d'au moins deux paramètres pour l'instant absolument inconnus. Lubès (1985), parmi d'autres, a proposé diverses fonctions de production et de transfert pour une modélisation hydrologique globale, qui peuvent être une base pour l'établissement d'un modèle ou de fonctions propres aux conditions régnant sur l'altiplano de la 2^{ème} Région du Chili.

En l'adaptant à la représentation proposée par VENSIM® cela devrait permettre d'améliorer la qualité de notre modèle.

FONCTION PRODUCTION

SIMULATION 1

FONCTION TRANSFERT



DÉBITS SIMULÉS

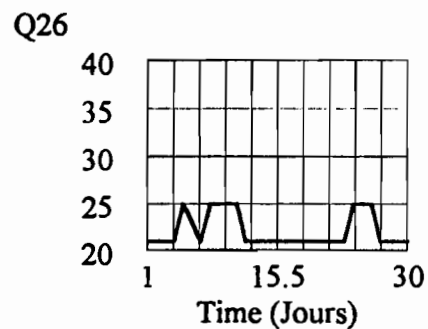
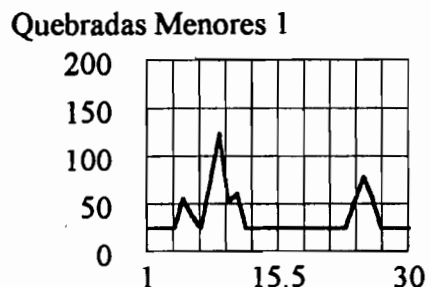
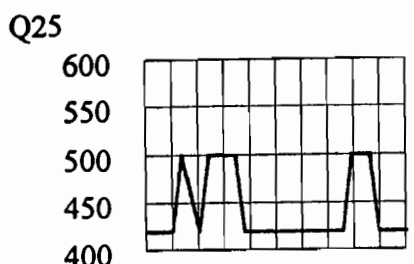
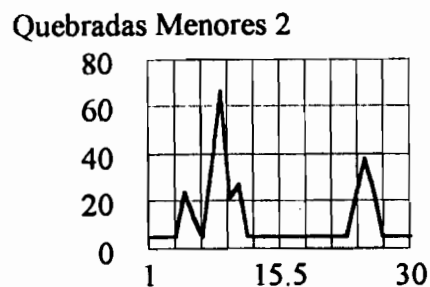
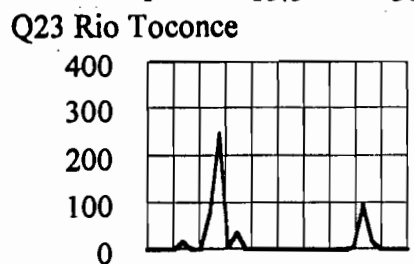
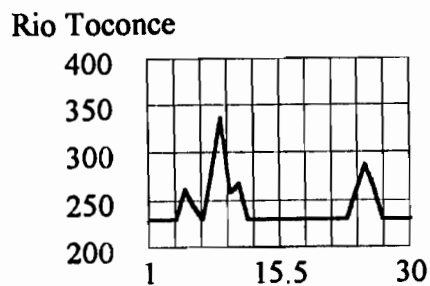
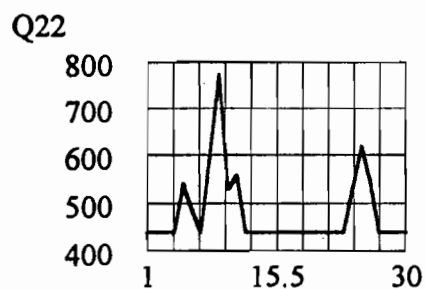


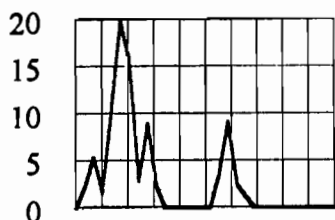
Fig. 32 : Principales résultats de la simulation avec averse fictive 1.

FONCTION PRODUCTION

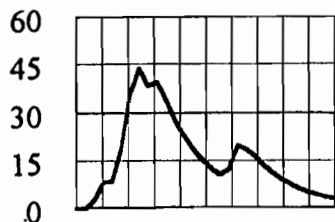
SIMULATION 2

FONCTION TRANSFERT

PN

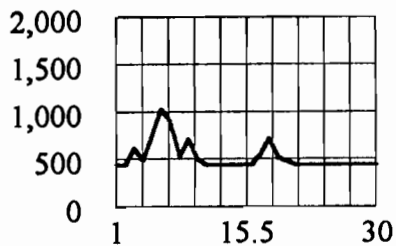


IPA

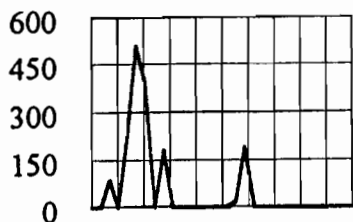


DÉBITS SIMULÉS

Q22



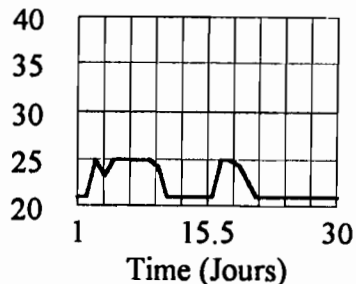
Q23 Rio Toconce



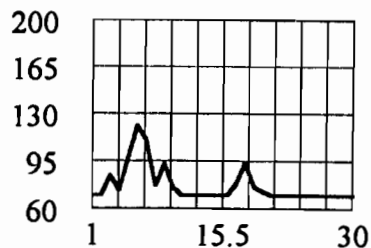
Q25



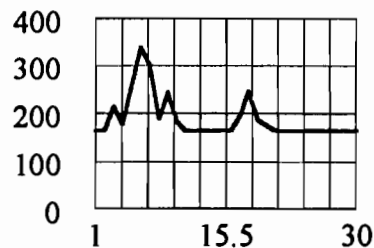
Q26



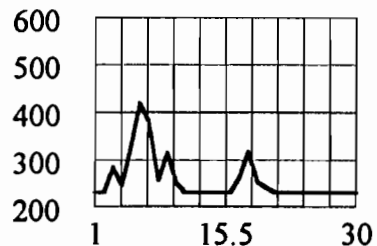
Q1



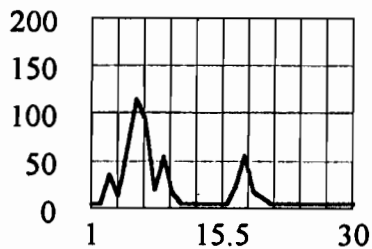
Q2



Rio Toconce



Quebradas Menores 2



Quebradas Menores 1

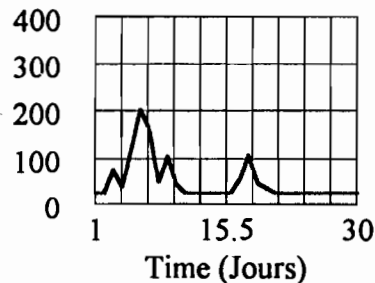
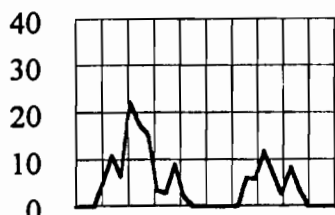


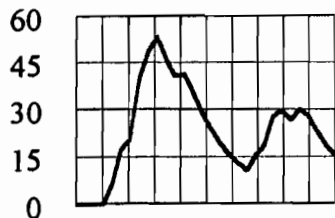
Fig. 33 : Principales résultats de la simulation avec averse fictive 2.

FONCTION PRODUCTION

PN



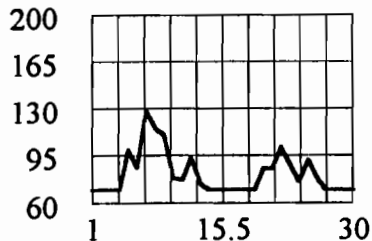
IPA



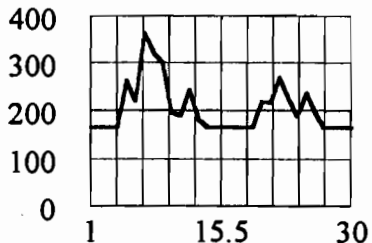
SIMULATION 3

FONCTION TRANSFERT

Q1

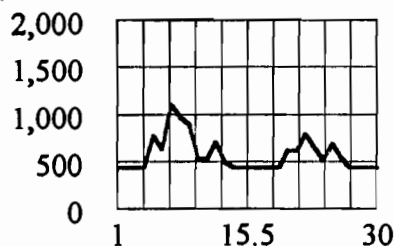


Q2

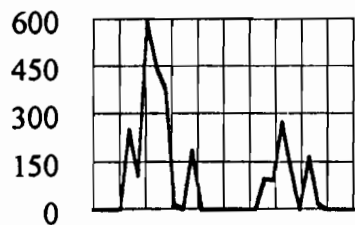


DÉBITS SIMULÉS

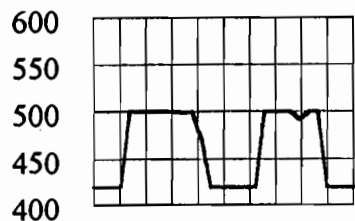
Q22



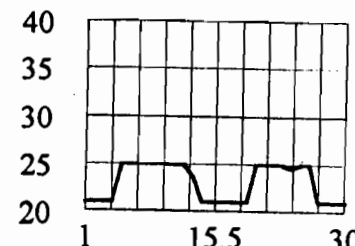
Q23 Rio Toconce



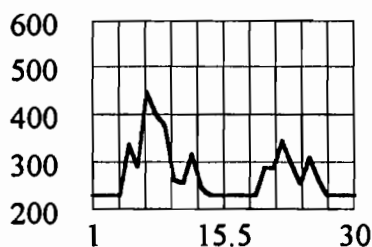
Q25



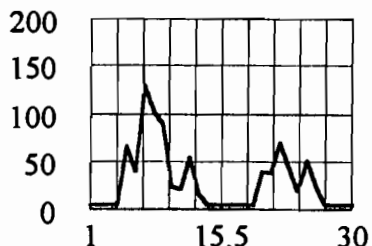
Q26



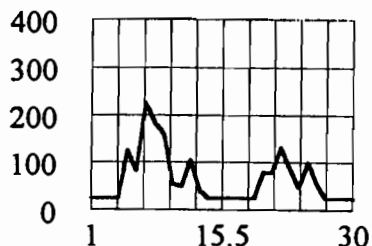
Rio Toconce



Quebradas Menores 2



Quebradas Menores 1

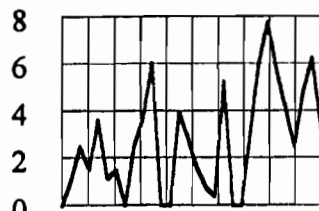


Time (Jours)

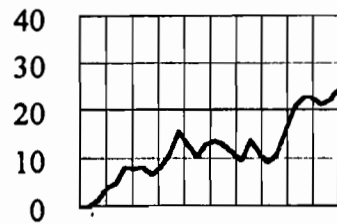
Fig. 34 : Principales résultats de la simulation avec averse fictive 3.

FONCTION PRODUCTION

PN

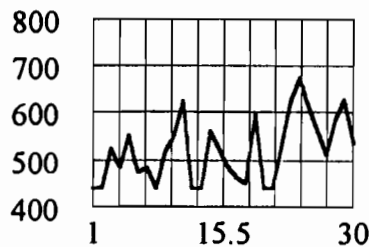


IPA

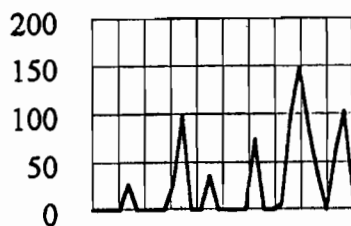


DÉBITS SIMULÉS

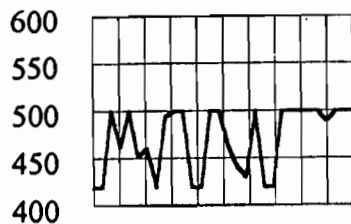
Q22



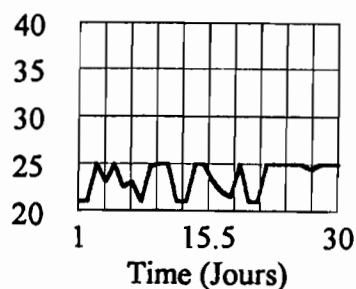
Q23 Rio Toconce



Q25



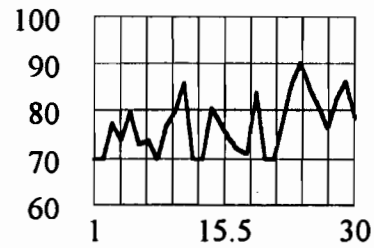
Q26



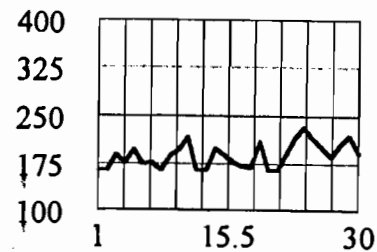
SIMULATION 4

FONCTION TRANSFERT

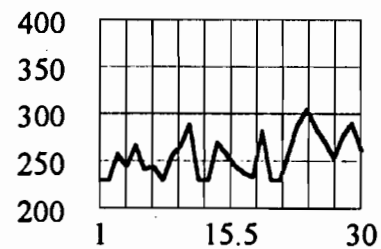
Q1



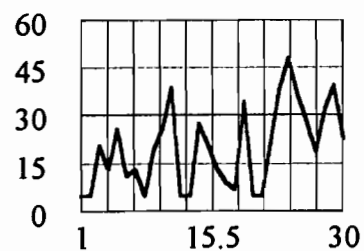
Q2



Rio Toconce



Quebradas Menores 2



Quebradas Menores 1

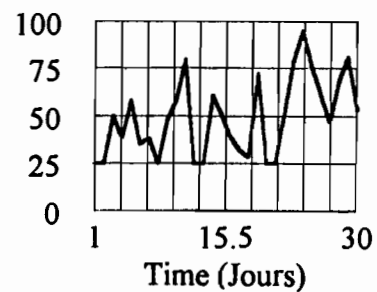


Fig. 35 : Principales résultats de la simulation avec averse fictive 4.

CONCLUSION

CONCLUSION

Dans ce travail on a réussi à construire un modèle hydraulique / hydrologique appliqué à un bassin versant de haute montagne, dans la Cordillère des Andes au nord du Chili. Ce modèle a été élaboré avec VENSIM[®], un logiciel très général de simulation, mais possédant des outils qui lui permettent de bien s'adapter à divers sujets. En particulier, dans ce travail, il a montré qu'il pouvait être performant, non seulement pour résoudre des problèmes d'hydraulique, ce que l'on était en droit d'attendre, mais aussi pour représenter des concepts hydrologiques en formulant des hypothèses adéquates.

Cependant, le manque de données d'observation dans plusieurs domaines n'a pas permis d'aller aussi loin qu'on aurait pu le souhaiter. En zone de haute montagne, présentant des périodes de pluies distribuées très irrégulièrement, courtes et intensives, on a pu constater qu'un seul poste pluviométrique n'est pas suffisant. Avec la méconnaissance des paramètres associés au comportement hydrologique du bassin versant, il est absolument nécessaire de pouvoir compter sur la connaissance de la distribution des précipitations à partir du suivi de plusieurs postes d'observation. L'influence des précipitations antérieures dans la réponse du bassin a bien été notée. Mais cela n'a pas été suffisant pour expliquer des situations comme celle de 1985.

Le modèle pourrait sûrement être mieux calé et validé (et probablement entièrement reconstruit) avec une caractérisation pédologique de la zone, avec la description des états de surface, avec la détermination de quelques paramètres représentatif du comportement des premiers centimètres de la zone non-saturée, etc., en résumé, avec une meilleure connaissance de la géomorphologie. Par la suite, cela pourrait faire de la simulation un outil utile pour aider à la gestion d'une ressource très rare et très convoitée dans le nord du Chili. La télédétection satellitaire, technique de description des milieux dont l'importance est croissante dans les études hydrologiques, peut être une grande aide, notamment pour caractériser les états de surface.

Pour l'instant, on peut faire une espèce *d'hydraulique-fiction*, avec des simulations appuyées sur des fonctions validés sous une forme approximative. Dans ce contexte, le modèle a bien répondu aux diverses averses proposées. L'application des fonctions de production et de transfert et la redistribution des débits se sont déroulées correctement.

Enfin on a constaté que VENSIM[®] est un logiciel performant dans notre domaine, sans être handicapé par toutes les contraintes imposées par le manque d'information pour la résolution de notre problème. Pour une application à une zone plus grande ou pour travailler sur des pas de temps inférieurs à la journée (une approche horaire serait beaucoup plus performante pour la gestion des périmètres irrigués ou des microcentrales hydroélectriques), on pourra utiliser des outils très intéressants (non employés dans ce mémoire), comme les fonctions *time (shift et base)*, *delay* (dans ses différentes modalités), *forecast*, etc. qui peuvent aider à mieux traiter le facteur temps dans le modèle notamment pour la simulation des crues.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- * ARAVENA, R. & SUZUKI, O., 1990 - Isotopic evolution of river water in the northern Chile region. *Water Resources Research*, Vol. 26, n° 12, p. 2887-2895.
- * BRUGGEN, J., 1942 - Geología de la puna de San Pedro de Atacama y sus formaciones de areniscas y arcillas rojas. *Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología, Anales*, vol. 2, Santiago, p. 342-367.
- * CALDERON, A., 1996 - Relación de las rocas volcánicas con el flujo y almacenamiento de agua subterránea. Sector Vegas de Turi, IIª Región, Antofagasta, Chile. *Memoire de Titulation à Géologie*, Université Catholique du Nord, Antofagasta, 78 p.
- * CHEVALLIER, P., 1983 - L'indice des précipitations antérieures. Évaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cahier ORSTOM, série Hydrologie*, vol. XX, N°s 3 et 4: p. 179-189.
- * CODELCO, 1977 - Revisión de conceptos básicos en problemas de agua potable y agua para la minería del cobre en la IIª Región, *Rapport du Dep. Recursos Hídricos*, Chuquicamata.
- * CORFO / Universidad de Chile, 1973 - Estudios de recursos hídricos de la cuenca del Loa. *Rapport du Dep. de Recursos Hídricos*, Santiago.
- * DESBORDES, M., 1984 - Modelisation en Hydrologie Urbaine. Recherches et Applications. *Docto. du Lab. d'Hydrologie Mathématique*. Univ. Montpellier II.
- * DEZETTER, A., 1987 - Modèle Global ORSTOM 74. Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. *DEA National d'Hydrologie*, Univ. Montpellier II, p. 5-30.
- * FUENZALIDA, H., 1971 - Climatología de Chile. *Dep. de Geofísica y Geodesia*. Universidad de Chile, Santiago. 72 p.
- * GONZALEZ, H., 1995 - Hidrogeología de la cuenca superior del río Loa, *Rapport d'avance du Memoire de Géologie*, Université Catholique du Nord, Antofagasta.
- * GROSJEAN, M. & NUÑEZ, L., 1994 - Lateglacial, Early and Middle Holocene environment, Human occupation and Resource use in the Atacama (Northern Chile). *Geoarchaeology: An Internat. Journal*, Vol. 9, N° 4, p. 271-286.
- * GUEST, J.E., 1969 - Upper tertiary ignimbrites in the Andean Cordillera of part of the Antofagasta province, northern Chile. *Geol. Soc. Am., Bull.*, vol. 80, n° 1, p. 337-362.
- * HARZA Engineering Company International S.A., 1978 - Developpements des Ressources d'Eau dans le Grand Nord du Chili, *Proyecto CHI-69/535 CORFO-DGA-CCC-P.N.U.D.*
- * IFARLE Ingenieros Consultores Ltda., 1982 - Estudio de Nuevas Fuentes de agua potable para el abastecimiento de las ciudades de Antofagasta, Calama, Tocopilla, Pampa Salitrera y Diagnóstico de la infraestructura existente, *Etude.ESSAN, Annexes Hydrologique et Hydrogéologique*, Antofagasta.
- * INYGE, 1991 - Analyse et Planification des Ressources d'Eau dans la IIème Région d'Antofagasta", Chili, *Docto. pour le Gouvernement Régional et ESSAN*.
- * KOHLER, M.A. & LINSLEY, R.K., 1951 - Predicting the runoff from the storm rainfall. Weather Bureau, U.S. Dep. of Commerce. *Research Paper*, n° 34, Washington, pp. 9.
- * KOHNENKAMP, J., 1993 - Bilan et Caracterisation des Ressources Hydriques Superficiales du Bassin Versant du Río Salado, II Región, Chili. *Memoire de Titule Ingénier Civil*, Univ. Catholique du Nord, Antofagasta.
- * LAHSEN, A., 1969 - Geología del área comprendida entre El Tatio y los Cerros de Ayquina. *Com. Geoterm (inedito)*. Corfo, Santiago, 69 p.

- * LUBES, H., 1985 - Identifications des fonctions de production et de transfert dans un modèle hydrologique global. Application au bassin de l'Orbieu à Lagrasse. *Memoire DEA d'hydrologie national*. Université Montpellier II. p. 35-40.
- * MESSERLI, B., GROSJEAN, M., BONANI, G., BURGI, A., GEYH, M., GRAF, K., RAMSEYER, K., ROMERO, H., SCHOTTERER, U., SCHREIER, H. & VUILLE, M., 1993 - Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18.000 years: a preliminar synthesis. *Mountain Research and Development*, Vol. 13, N° 2, p. 117-127.
- * POURRUT, P. & COVARRUBIAS, A., 1995 - Existencia de Agua en la II Región de Chile: Interrogantes e Hipótesis. *Bulletin Institute Français d'études andines*, Vol. 3, N° 24: p. 505-515
- * POURRUT, P. & COVARRUBIAS, A., 1994 - High mountain basins in Northern Chile: water balance problems in volcanic complex, *in: Conference on Assessment of Hydrological temporal variability and changes*: 129-140, Barcelona.
- * RIBSTEIN, P., 1990 - Modèles de Crues et Petits Bassins Versants au Sahel. *Thèse de Doctorat*. Univ. Montpellier II, p. 99-120.

ANNEXE

PRECIPITATION JOURNALIERE [mm]

STATION : **LINZOR**
 CODIGO BNA: 02105052-0
 BASIN : LOA SUB-BASIN: TOCONCE

LATITUDE S: 22 12
 LONGITUDE W: 67 59
 ALTITUD : 4.096 msnm

JOUR jan fev mar avr mai juin jui août sep oct nov dec

ANNEE 1989

JOUR jan fev mar avr mai juin jui août sep oct nov dec

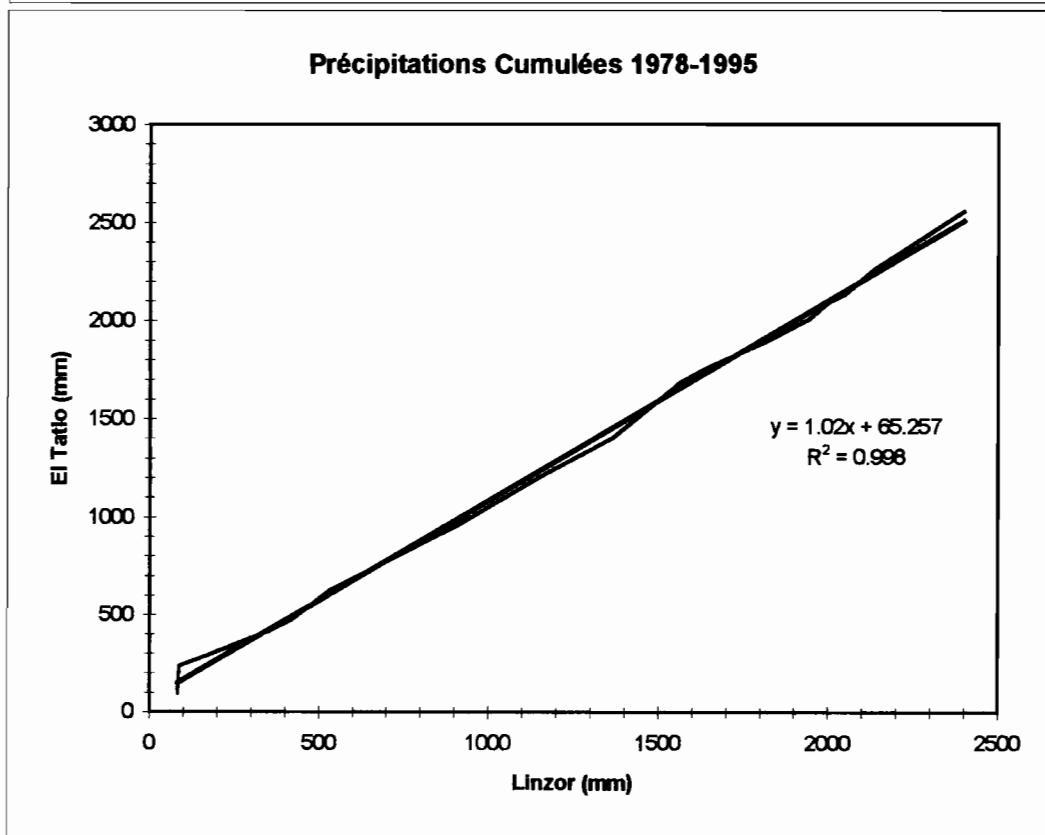
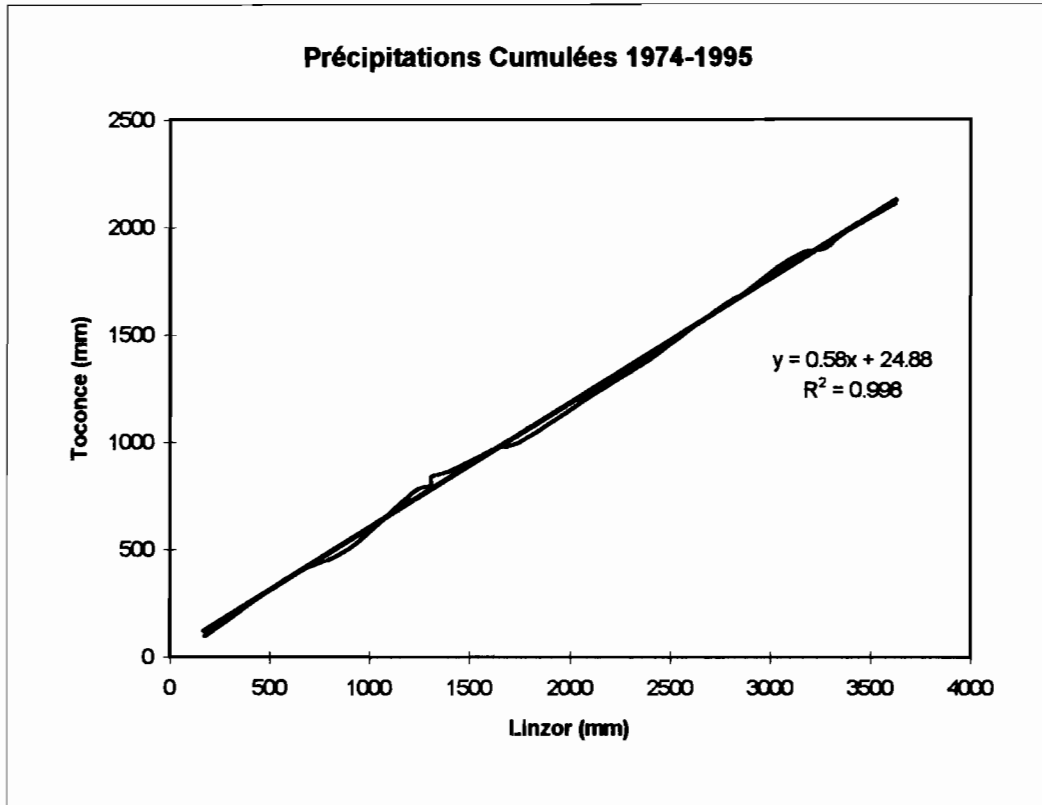
ANNEE 1990

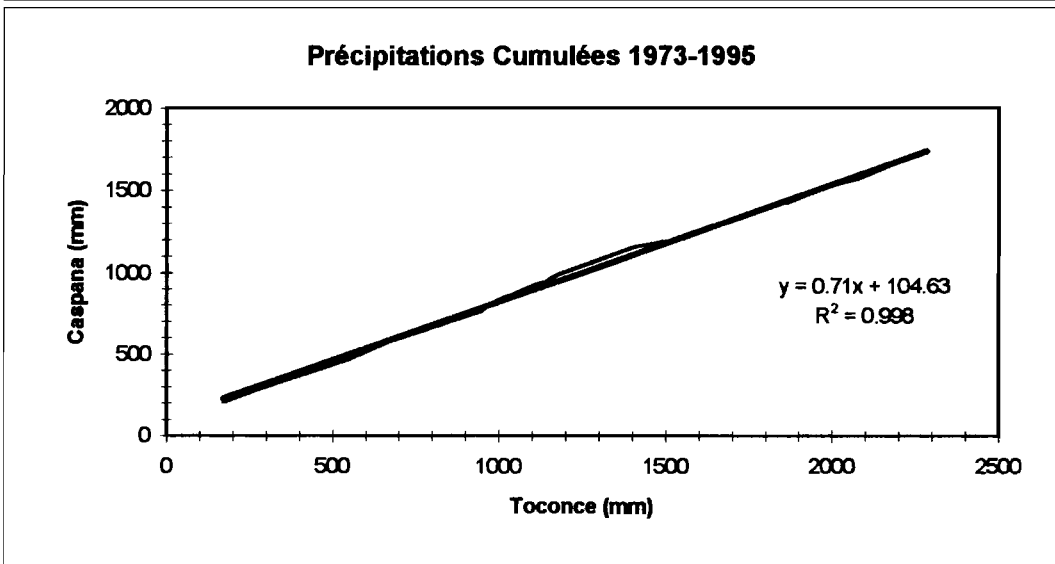
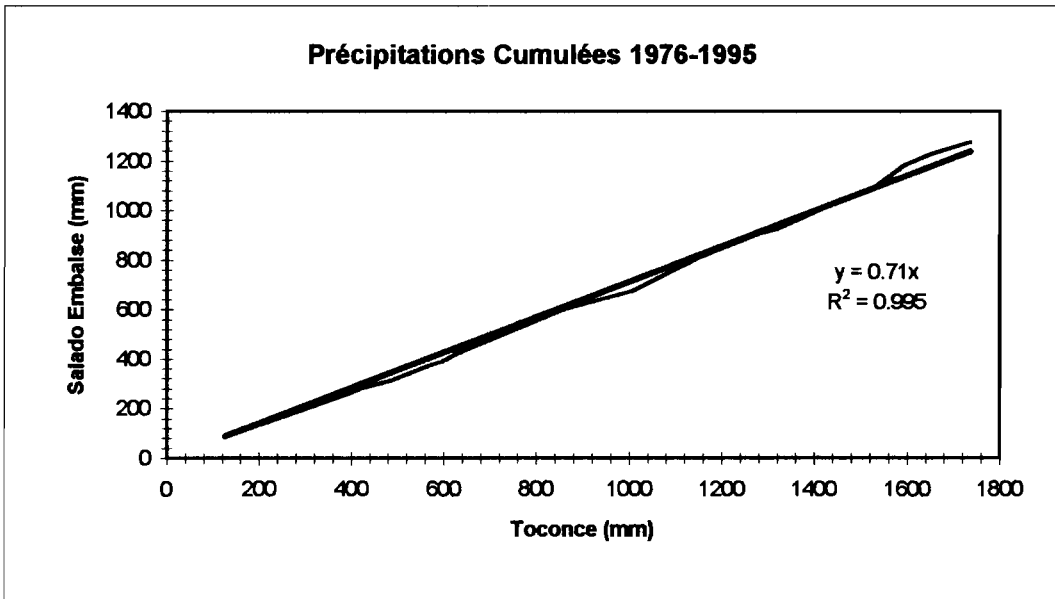
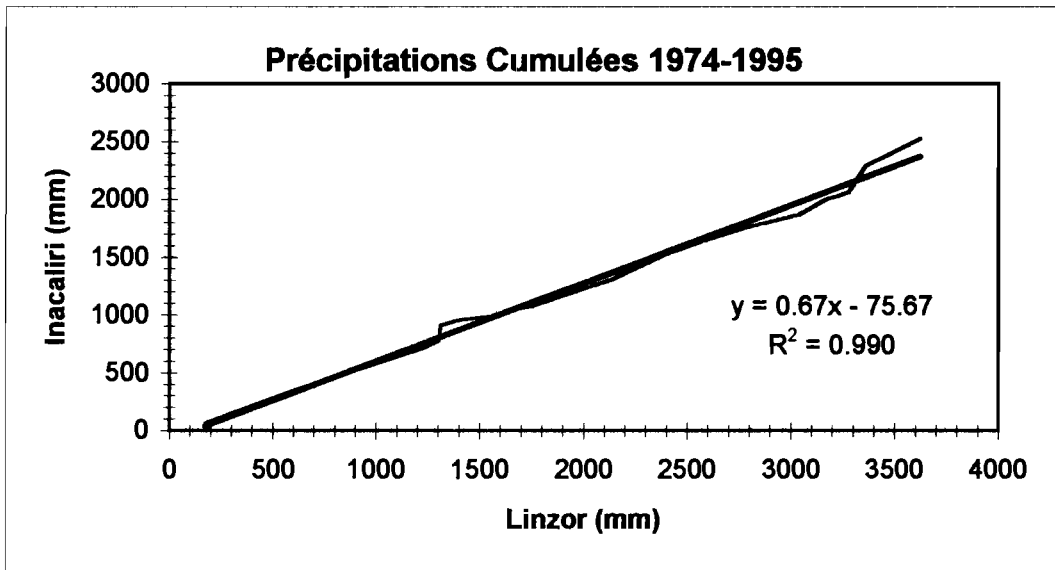
1												
2												
3		3,5										
4		4,1										
5		1,0	1,0									
6		5,2										
7		8,8										
8		14,0										
9		5,5										
10		28,5										
11		12,0										
12		6,7										
13		22,5										
14		7,0										
15		4,5										
16		1,5										
17		0,5										
18		4,5										
19		0,5			0,2							
20		4,0	2,5		6,4							
21		1,5	2,7		0,3							
22		1,5										
23		11,0										
24		0,5										
25		6,0										
26	2,0											
27												
28			0,4									
29												
30												
31			1,6									
total	2,0	154,8	8,2	0,0	0,0	6,9	-	-	-	-	-	0,0
24hr-jour	2.0 26	28.5 10	2.7 21	0.0 1	0.0 1	6.4 20	-	-	-	-	-	0.0 1
48hr-jour	2.0 26	40.5 10	5.2 20	0.0 1	0.0 1	6.7 20	-	-	-	-	-	0.0 1
72hr-jour	2.0 26	48.0 8	5.2 20	0.0 1	0.0 1	6.9 19	-	-	-	-	-	0.0 1

Total annuel:	172	NOMBRE DE JOURS AVEC :	PRECIPITATION MAX. ANNUEL EN:
Max. mensuel:	154.8 fev	Precipitation > 0.1 mm :	24HR [m-] : 28,5 fev 10
		Precipitation > 1.0 mm :	48HR [m-] : 40,5 fev 10
		Precipitation > 10.0 mm:	72HR [m-] : 48,0 fev 8

1												
2												
3						0,5						
4												
5	1,5											
6												
7	0,5											
8												
9	0,5	0,2										
10	0,5	0,3										
11		0,5	3,5			1,9						
12		0,5										
13		0,4										
14												
15	0,5											
16					0,5							
17					0,5			0,6				
18					0,5							
19		5,0										
20					0,5							
21												
22												2,5
23	1,5											5,0
24												16,0
25												17,0
26												5,0
27												16,0
28								0,5				11,0
29												8,0
30												3,0
31	11,5											10,5
total	16,5	6,9	3,5	0,0	2,0	2,4	0,0	0,6	0,5	0,0	0,0	94,0
24hr-jour	11.5 31	5.0 19	3.5 11	0.0 1	0.5 16	1.9 11	0.0 1	0.6 17	0.5 27	0.0 1	0.0 1	17.0 25
48hr-jour	11.5 31	5.0 19	3.5 11	0.0 1	1.0 17	1.9 11	0.0 1	0.6 17	0.5 27	0.0 1	0.0 1	33.0 24
72hr-jour	11.5 31	5.0 19	3.5 11	0.0 1	1.5 16	1.9 11	0.0 1	0.6 17	0.5 27	0.0 1	0.0 1	38.0 25

Total annuel:	126	NOMBRE DE JOURS AVEC :	PRECIPITATION MAX. ANNUEL EN:
Max. mensuel:	94.0 dec	Precipitation > 0.1 mm :	24HR [m-] : 17,0 dec 25
		Precipitation > 1.0 mm :	48HR [m-] : 33,0 dec 24
		Precipitation > 10.0 mm:	72HR [m-] : 38,0 dec 25





DEBITS MOYENNES JOURNALIERES (m3/s)

STATION : TOCONCE AVANT CAPTAGE ESSAN
 CODE BNA : 02105007-5
 BASIN : LOA LATITUDE S: 22 18 ALTTITUDE : 3,355 msnm
 SUB-BASIN : TOCONCE LONGITUDE W: 88 09 SURF. BASIN : 174 Km²

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	-----	-----	-----	-----

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	-----	-----	-----	-----

ANNEE 1983

1	0,384	0,412	0,388	0,401	0,388				0,358	0,306	0,230	0,330
2	0,412	0,416	0,388	0,388	0,388				0,231	0,334	0,255	0,316
3	0,425	0,416	0,388	0,391	0,388	0,388			0,175	0,290	0,265	0,326
4	0,396	0,416	0,388	0,388	0,388	0,388			0,183	0,188	0,305	0,303
5	0,404	0,416	0,388	0,399	0,388	0,388			0,166	0,102	0,227	0,310
6	0,398	0,416	0,388	0,390	0,388	0,388			0,161	0,086	0,286	0,336
7	0,514	0,414	0,388	0,388	0,388	0,388			0,164	0,110	0,282	0,336
8	0,332	0,394	0,388	0,388	0,388	0,388			0,146	0,138	0,270	0,340
9	0,332	0,398	0,388	0,388	0,388	0,388			0,268	0,137	0,288	0,322
10	0,332	0,393	0,388	0,388	0,388	0,388				0,132	0,268	0,328
11	0,333	0,397	0,388	0,388	0,388	0,388				0,122	0,283	0,332
12	0,336	0,398	0,388	0,384	0,388	0,388				0,174	0,289	0,346
13	0,332	0,402	0,376	0,388	0,380	0,388				0,139	0,286	0,290
14	0,356	0,398	0,374	0,388	0,381	0,388				0,104	0,294	0,230
15	0,374	0,402	0,375	0,388	0,388	0,388				0,077	0,253	0,280
16	0,371	0,402	0,384	0,388	0,383	0,388					0,180	0,290
17	0,360	0,402	0,388	0,388	0,388	0,388					0,210	0,328
18	0,360	0,402	0,388	0,388	0,377	0,388					0,216	
19	0,360	0,402	0,388	0,388	0,378						0,202	
20	0,360	0,399	0,388	0,388	0,381						0,150	
21	0,360	0,388	0,388	0,388	0,381					0,419	0,111	
22	0,360	0,391	0,388	0,388	0,384					0,418	0,097	
23	0,360	0,402	0,387	0,388	0,384				0,368	0,392	0,157	
24	0,360	0,397	0,388	0,389	0,412				0,298	0,324	0,313	
25	0,365	0,398	0,388	0,388	0,395		0,405		0,365	0,292	0,238	
26	0,372	0,397	0,387	0,388	0,388			0,383	0,388	0,236	0,253	0,349
27	0,386	0,392	0,380	0,388	0,388			0,338	0,404	0,289	0,268	0,357
28	0,388	0,388	0,384	0,388	0,388			0,342	0,410	0,233	0,275	0,382
29	0,388		0,402	0,388				0,348	0,400	0,147	0,328	0,332
30	0,388		0,402	0,388				0,312	0,322	0,187	0,317	0,393
31	0,388		0,399					0,360		0,214		0,406

ANNEE 1984

1	0,425				0,375	0,380			0,391	0,339	0,398	0,395	0,445	0,388
2	0,454	0,401			0,374	0,397			0,404	0,394	0,415	0,354	0,441	0,373
3	0,488	0,400			0,370	0,397			0,410	0,352	0,366	0,408	0,418	0,374
4	0,812	0,427			0,424	0,400			0,415	0,385	0,407	0,406	0,399	0,374
5	1,230	0,426			0,370	0,349			0,452	0,401	0,410	0,400	0,449	0,389
6		0,409			0,377	0,390			0,428	0,405	0,406	0,420	0,379	0,377
7		0,448			0,373	0,388			0,390	0,394	0,411	0,387	0,303	0,374
8		0,467			0,371	0,387			0,391	0,399	0,380	0,438	0,386	0,378
9		0,421			0,379	0,331			0,382	0,384	0,343	0,394	0,388	0,365
10		0,382			0,371	0,088			0,395	0,382	0,381	0,398	0,382	0,378
11		0,419			0,338	0,028			0,398	0,480	0,391	0,383	0,376	0,299
12		0,423			0,372	0,132			0,412	0,397	0,344	0,392	0,359	0,365
13		0,384			0,358	0,314			0,396	0,420	0,346	0,395	0,383	0,360
14		0,426			0,343	0,305			0,409	0,415	0,396	0,410	0,380	0,384
15		0,417			0,381	0,361			0,408	0,411	0,407	0,397	0,357	0,357
16		0,402			0,336	0,382			0,399	0,400	0,481	0,390	0,374	0,352
17		0,497			0,366	0,337			0,421	0,402	0,435	0,390	0,418	0,327
18		0,492			0,374	0,374			0,398	0,398	0,402	0,316	0,397	0,314
19		0,522			0,368	0,381			0,414	0,408	0,434	0,396	0,338	0,205
20		0,487			0,385	0,348			0,523	0,411	0,412	0,393	0,366	0,348
21					0,388	0,384			0,415	0,406	0,417	0,374	0,373	0,350
22					0,375	0,385			0,367	0,403	0,406	0,389	0,382	0,341
23					0,379	0,375			0,419	0,407	0,387	0,385	0,382	0,327
24					0,379	0,354			0,388	0,384	0,352	0,331	0,396	0,334
25					0,388	0,377			0,427	0,348		0,405	0,387	0,331
26					0,401	0,381	0,414		0,398	0,423		0,320	0,388	0,343
27					0,393	0,351	0,405	0,390	0,402			0,403	0,373	0,319
28					0,311	0,373	0,396	0,422	0,393	0,405	0,410	0,409	0,376	0,323
29					0,396	0,381		0,402	0,387	0,410	0,422	0,407	0,425	0,325
30					0,363	0,385		0,402	0,388	0,402	0,428	0,421	0,399	0,337
31					0,373				0,389	0,393		0,451		0,351

Q MOY	0,374	0,402	0,387	0,389	0,387	0,388	-	0,355	0,284	0,215	0,247	0,325
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---	-------	-------	-------	-------	-------

Q.MOY.MAX. JOUR	0,514	0,418	0,402	0,401	0,412	0,388	-	0,405	0,410	0,419	0,328	0,406
Q.MOY.MIN. JOUR	0,332	0,388	0,374	0,384	0,377	0,388	-	0,312	0,148	0,077	0,097	0,230
Q.INST.MAX. JOUR	3,560	0,416	0,402	0,418	0,416	0,388	-	0,542	0,510	0,542	0,402	0,608
Q.INST.MIN. JOUR	0,332	0,374	0,374	0,374	0,374	0,388	-	0,230	0,108	0,086	0,090	0,162

Q MOY	0,641	0,434	0,361	0,374	0,338	0,406	0,406	0,398	0,398	0,391	0,396	0,348
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Q.MOY.MAX. JOUR	1,230	0,522	0,396	0,424	0,400	0,422	0,523	0,480	0,481	0,451	0,449	0,388
Q.MOY.MIN. JOUR	0,425	0,382	0,311	0,336	0,028	0,402	0,367	0,339	0,343	0,316	0,303	0,205
Q.INST.MAX. JOUR	4,370	0,574	0,558	0,574	0,628	0,558	0,992	0,608	0,608	0,910	0,606	0,558
Q.INST.MIN. JOUR	0,242	0,242	0,214	0,058	0,026	0,398	0,214	0,230	0,242	0,082	0,120	0,034

DEBITS MOYENNES JOURNALIERES (m3/s)

STATION : TOCONCE AVANT CAPTAGE ESSAN
 CODE BNA : 02105007-5
 BASIN : LOA LATITUDE S: 22 18 ALTITUDE : 3,355 mnm
 SUB-BASIN : TOCONCE LONGITUDE W: 88 09 SURF. BASIN : 174 Km²

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	-----	-----	-----	-----

JOUR	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	-----	-----	-----	-----

ANNEE 1993

1	0,457	0,422	0,431	0,444	0,400	0,425	0,448	0,449	0,481	0,458		0,431
2	0,489	0,434	0,432	0,448	0,402	0,425	0,442	0,453	0,484	0,481		0,433
3	0,443	0,437	0,430	0,444	0,402	0,424	0,444	0,452	0,483	0,451		0,432
4	0,439	0,442	0,433	0,440	0,408	0,428	0,448	0,450	0,455	0,451		0,433
5	0,431	0,472	0,428	0,438	0,407	0,428	0,447	0,450	0,485	0,450		0,432
6	0,424	0,481	0,429	0,430	0,408	0,429	0,450	0,457	0,488	0,447		0,434
7	0,433	0,442	0,427	0,435	0,403	0,432	0,440	0,450	0,463	0,450		0,438
8	0,429	0,436	0,435	0,433	0,403	0,436	0,442	0,445	0,489	0,454		0,431
9	0,438	0,429	0,435	0,438	0,402	0,434	0,439	0,449	0,482	0,454		0,428
10	0,430	0,428	0,433	0,434	0,411	0,438	0,443	0,482	0,481	0,450		0,437
11	0,425	0,428	0,425	0,439	0,410	0,438	0,449	0,485	0,481	0,451	0,403	0,438
12	0,433	0,430	0,415	0,431	0,409	0,441	0,454	0,474	0,484	0,451	0,418	0,435
13	0,450	0,434	0,408	0,431	0,404	0,444	0,454	0,487	0,482	0,452	0,407	0,433
14	0,458	0,432	0,420	0,418	0,405	0,448	0,458	0,482	0,455	0,448	0,419	0,419
15	0,455	0,428	0,419	0,402	0,405	0,445	0,455	0,481	0,455	0,449	0,432	0,432
16	0,442	0,428	0,415	0,401	0,407	0,440	0,458	0,459	0,450	0,451	0,428	0,373
17	0,437	0,431	0,400	0,403	0,409	0,448	0,454	0,455	0,454	0,450	0,428	0,423
18	0,431	0,430	0,420	0,405	0,408	0,447	0,448	0,458	0,458	0,448	0,431	0,408
19	0,438	0,428	0,422	0,408	0,413	0,445	0,449	0,480	0,481	0,448	0,432	0,422
20	0,797	0,431	0,422	0,411	0,418	0,442	0,453	0,470	0,458	0,456	0,433	0,423
21	0,481	0,435	0,418	0,405	0,418	0,441	0,452	0,476	0,453		0,434	0,419
22	0,451	0,427	0,425	0,404	0,412	0,448	0,482	0,488	0,458		0,435	0,418
23	0,483	0,434	0,430	0,407	0,417	0,443	0,481	0,452	0,483		0,435	0,422
24	0,482	0,435	0,431	0,410	0,418	0,444	0,458	0,444	0,458		0,429	0,420
25	0,440	0,440	0,441	0,408	0,411	0,441	0,480	0,481	0,459		0,429	0,418
26	0,427	0,438	0,450	0,405	0,413	0,440	0,483	0,459	0,459		0,424	0,432
27	0,424	0,433	0,482	0,408	0,420	0,442	0,457	0,452	0,454		0,430	0,430
28	0,417	0,430	0,538	0,399	0,421	0,442	0,458	0,450	0,448		0,434	0,421
29	0,418		0,493	0,407	0,423	0,442	0,454	0,449	0,454		0,429	0,429
30	0,414		0,471	0,403	0,428	0,448	0,454	0,453	0,455		0,430	0,433
31	0,415		0,452		0,424		0,452	0,459				0,425

ANNEE 1994

1	0,421	0,454	0,445	0,443	0,428	0,435	0,441	0,451	-	-	-	-
2	0,428	0,450	0,449	0,437	0,425	0,432	0,442	0,451	-	-	-	-
3	0,430	0,458	0,447	0,440	0,423	0,438	0,441	0,448	-	-	-	-
4	0,422	0,474	0,453	0,445	0,421	0,432	0,447		-	-	-	-
5	0,423	0,470	0,448	0,445	0,425	0,432	0,448		-	-	-	-
6	0,420	0,485	0,454	0,448	0,425	0,433	0,448		-	-	-	-
7	0,422	0,444	0,484	0,444	0,427	0,431	0,447		-	-	-	-
8	0,424	0,440	0,480	0,440	0,432	0,429	0,453		-	-	-	-
9	0,425	0,453	0,607	0,441	0,429	0,424	0,452		-	-	-	-
10	0,430	0,458	0,751	0,444	0,432	0,430	0,451		-	-	-	-
11	0,429	0,451	0,536	0,444	0,430	0,435	0,459		-	-	-	-
12	0,428	0,450	0,510	0,440	0,432	0,438	0,455		-	-	-	-
13	0,437	0,458	0,482	0,428	0,433	0,431	0,451		-	-	-	-
14	0,435	0,458	0,488	0,420	0,431	0,438	0,450		-	-	-	-
15	0,327	0,450	0,482	0,423	0,428	0,447	0,451		-	-	-	-
16	0,083	0,458	0,482	0,438	0,423	0,446	0,451		-	-	-	-
17	0,159	0,440	0,453	0,429	0,420	0,449	0,452		-	-	-	-
18	0,431	0,445	0,453	0,422	0,418	0,449	0,441		-	-	-	-
19	0,439	0,440	0,450	0,423	0,414	0,450	0,437		-	-	-	-
20	0,404	0,451	0,447	0,429	0,417	0,447	0,429		-	-	-	-
21	0,427	0,449	0,447	0,429	0,422	0,445	0,425		-	-	-	-
22	0,429	0,448	0,448	0,428	0,418	0,448	0,442		-	-	-	-
23	0,432	0,443	0,438	0,430	0,421	0,444	0,444		-	-	-	-
24	0,421	0,448	0,433	0,425	0,422	0,444	0,439		-	-	-	-
25	0,428	0,448	0,429	0,420	0,425	0,445	0,442		-	-	-	-
26	0,429	0,438	0,425	0,425	0,428	0,445	0,443		-	-	-	-
27	0,430	0,441	0,428	0,424	0,427	0,443	0,445		-	-	-	-
28	0,440	0,449	0,427	0,425	0,430	0,442	0,448		-	-	-	-
29	0,439		0,434	0,419	0,431	0,449	0,450		-	-	-	-
30	0,439		0,453	0,420	0,431	0,449	0,450		-	-	-	-
31	0,442		0,450		0,435		0,447		-	-	-	-

Q MOY	0,450	0,435	0,435	0,419	0,411	0,439	0,452	0,458	0,459	0,451	0,427	0,428
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Q.MOY.MAX.	0,797	0,481	0,538	0,446	0,428	0,448	0,483	0,485	0,489	0,461	0,435	0,438
JOUR	20	8	28	2	30	22	28	11	8	2	22	7
Q.MOY.MIN.	0,414	0,422	0,400	0,399	0,400	0,424	0,439	0,444	0,448	0,448	0,403	0,373
JOUR	30	1	17	28	1	3	9	24	28	19	11	18
Q.INST.MAX.	4,810	0,880	1,210	0,580	0,588	0,815	0,891	0,891	0,889	0,855	0,585	0,637
JOUR	20	5	28	11	31	17	24	11	7	2	21	29
Q.INST.MIN.	0,112	0,249	0,244	0,253	0,243	0,261	0,098	0,235	0,247	0,243	0,261	0,080
JOUR	11	12	12	15	12	1	10	4	27	4	12	18

Q MOY	0,405	0,451	0,489	0,432	0,428	0,440	0,448	0,450	-	-	-	-
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---	---	---	---

Q.MOY.MAX.	0,442	0,474	0,751	0,448	0,435	0,450	0,459	0,451	-	-	-	-
JOUR	31	4	10	8	31	19	11	2	-	-	-	-
Q.MOY.MIN.	0,083	0,438	0,425	0,419	0,414	0,424	0,425	0,448	-	-	-	-
JOUR	16	28	28	29	19	9	21	3	-	-	-	-
Q.INST.MAX.	0,815	0,882	2,180	0,855	0,833	0,842	0,745	0,714	-	-	-	-
JOUR	9	13	9	8	11	8	25	1	-	-	-	-
Q.INST.MIN.	0,080	0,109	0,228	0,215	0,230	0,215	0,107	0,212	-	-	-	-
JOUR	17	8	25	13	18	29	21	2	-	-	-	-

HYDROGRAMMES ANNUELLES A STATION TOCONCE

