

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE DE MONTPELLIER II

SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

THESE

présentée à l'Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc pour obtenir le diplôme de
DOCTORAT

Spécialité :	Mécanique, génie mécanique, génie civil
Formation Doctorale :	Sciences de l'eau dans l'environnement continental
Ecole Doctorale :	Géosciences

IMPORTANCE ET FONCTIONNEMENT DES PETITS BARRAGES DANS UNE ZONE SEMI-ARIDE DU NORD-MEXIQUE

par

Juan ESTRADA AVALOS

soutenue le 9 décembre 1999 devant le Jury composé de :

M. Michel DESBORDES	Professeur, Université Montpellier II	Président
M. Pierre HUBERT	Professeur, Ecole des Mines	Rapporteur
M. Ignacio SANCHEZ COHEN	Directeur de Recherche INIFAP	Rapporteur
M. Patrick LE GOULVEN	Directeur de Recherche, IRD	Directeur de thèse
M. Jean Marie LAMACHERE	Chargé de Recherche, IRD	Examineur
M. José Luis GONZALEZ BARRIOS	Chercheur INIFAP Mexique	Examineur

Résumé

Dans une région semi-aride du Nord-Mexique, le principal objectif de ce travail de thèse est d'analyser le fonctionnement de petites retenues (*presones*) et d'établir quel pourrait être leur rôle dans un système d'exploitation orienté vers l'élevage extensif bien maîtrisé par une gestion rationnelle des pâturages. Le ranch Atotonilco, d'une superficie de 450 km², correspond bien à ce type de système d'exploitation. Il est situé dans la partie médiane de la région hydrologique 36 (RH36), sur le grand bassin versant endoréique du Rio Nazas, dans une zone montagneuse entre 1800 et 2400 m d'altitude où la précipitation moyenne annuelle est de 450 mm et la saison pluvieuse principalement estivale. Pour maîtriser la gestion des pâturages et abreuver le bétail en lui évitant de trop longs déplacements, un important équipement a été installé dès le début des années 20. Pour la maîtrise des pâturages, le dispositif comprend actuellement 102 enclos. Il permet une charge animale de près de 4500 têtes de bétail (1 UA pour 10 ha). Pour abreuver les animaux, 69 forages, 300 abreuvoirs et 61 petites retenues ont été installés.

Les observations, faites sur une période de cinq ans avec un réseau de 30 postes pluviométriques répartis sur l'ensemble du ranch et sur une période de trois ans sur 7 bassins versants représentatifs des différents types de matériaux géologiques, ont permis de dégager les principales caractéristiques hydropluviométriques de cette région. Pour 100 m de dénivellée, un accroissement annuel moyen de 30 mm, combiné à une augmentation de 5 jours de pluie, caractérise les pluies annuelles. D'après les enregistrements pluviographiques, plus de 70 % du total d'une averse estivale tombe en 30 minutes et l'analyse spatiale des précipitations révèle que la taille des cellules pluvieuses estivales varie de quelques km² à plusieurs dizaines de km². Les plus grandes couvrent la totalité du ranch.

Les 7 bassins versants étudiés, dont la superficie est comprise entre 0,1 et 5 km², présentent des coefficients annuels d'écoulement très variables et très faibles pour l'année 1996, légèrement supérieure à la médiane : 2 à 3,5 % sur matériaux calcaires, rhyolitiques ou colluviaux et moins de 0,5 % sur les basaltes et conglomérats basaltiques. A l'échelle des événements pluvieux, l'analyse des relations entre les lames ruisselées et les variables pluviométriques montre très nettement le rôle de l'intensité des pluies dans la genèse du ruissellement, ce qui nous a conduit à définir comme principale variable explicative la pluie utile (PUIL) à partir d'un seuil d'intensité de pluie (IL), fonction exponentielle décroissante d'un indice des pluies antérieures (IK). Le modèle hydrologique retenu pour reconstituer les lames ruisselées est un modèle global déterministe quadratique à 5 paramètres. L'emploi de ce modèle nous a permis de reconstituer 13 années d'apports sur trois bassins versants en utilisant la série des pluies journalières observées à Atotonilco (1971-1983) et les caractéristiques pluviométriques régionales. Une analyse en composantes principales (ACP) des variables descriptives des 7 bassins versants et des 5 paramètres hydropluviométriques associés au modèle quadratique nous a conduit à l'établissement d'une typologie hydrologique des bassins. Le croisement de cette typologie avec celle des 61 bassins versants équipés de petites retenues a permis la définition des règles d'une transposition du modèle quadratique à l'ensemble du ranch.

Les études emmenées sur l'ensemble du système de distribution de l'eau montre que l'eau des retenues est, dans la situation actuelle, très peu utilisée par le bétail. Seul un pourcentage égal à 1,26 % du volume stocké a servi, sur les années 1996 et 1997, à l'abreuvement des animaux. La durée de séjour de l'eau dans les retenues est très courte : 5 à 8 mois en 1996, année légèrement supérieure à la médiane. Même avec un abreuvement in situ les retenues ne peuvent donc servir tout au long de l'année. Diverses modifications sont proposées pour favoriser l'utilisation de l'eau des *presones*, ce qui permettrait d'importantes économies de carburant, celui-ci étant utilisé pour l'exhaure des eaux souterraines. La plus importante de ces modifications consiste à connecter les retenues au réseau de distribution de l'eau dans une partie des 280 abreuvoirs, les autres concernant le surcreusement et l'imperméabilisation des cuvettes. Ces améliorations sont testées, sur plusieurs exemples, dans leurs effets sur la gestion des eaux du ranch.

Abstract

In a semi-arid area of North-Mexico, the main objective of this thesis is to analyze the functioning of small reservoirs (*presones*) and to establish their role in an extensive breeding system, well controlled by a rational pasture management. Located in a semi-arid zone with a mean annual rainfall of 450 mm, the Atotonilco ranch corresponds well to this type of operating system. In order to control the management of the pastures and to water the cattle in this 450 km² ranch, significant equipment, including in particular 61 *presones*, 68 drillings, 280 feeding troughs and more than 200 km of fences, has been installed since 1920.

The five years of observations made in the ranch made it possible to establish the major rainfall characteristics of this area. At the scale of the rain events, the analysis of the relationships between the depth of surface runoff and the rainfall variables, on 7 small watersheds located upstream of *presones*, very clearly shows the role of rainfall intensity in the genesis of the surface runoff. This led us to the construction of a quadratic deterministic lumped model with 5 parameters. By using 13 years of daily rainfall observed on the Atotonilco ranch, we reconstituted 13 years of daily surface runoff for three watersheds.

The studies made on the whole system of water distribution show that the water of reservoirs is, in the current situation, very lightly used by the cattle. Only 1,3 % of the stored volume was used for the watering of the animals in 1996 and 1997. Three modifications are proposed to increase the use of the water of the *presones*: connect in of the reservoirs to the water distribution system, digging and proofing of basins. The effects of these modifications on the water balance are analyzed by simulation of the functioning of a few reservoirs. Nine indices are used to evaluate the individual and total performances of *presones*.

Resumen

Dentro de una zona semiárida del Norte de México, el principal objetivo de esta tesis es el de analizar el funcionamiento hidrológico de los bordos de retención (presones) y de establecer su importancia dentro de un sistema de explotación pecuaria racional. La zona de estudio, rancho Atotonilco, con una superficie de 450 Km², corresponde a este tipo de sistemas. El rancho se ubica en la parte media de la Región Hidrológica 36 (RH36), sobre la cuenca endorreica del río Nazas, en una zona montañosa de 1800 a 2400 metros y con una precipitación media anual de 450 mm principalmente de tipo estival. Para realizar una explotación racional del pastizal y abrevar al ganado evitándole grandes desplazamientos, un importante dispositivo se ha venido instalando desde principio de los años 20. Actualmente este dispositivo comprende 102 potreros. Esto permite una carga animal de 1 unidad animal por cada 10 hectáreas. Para abrevar al ganado, se han instalado 69 pozos profundos, 300 abrevaderos y 61 bordos de retención.

Las observaciones, realizadas durante cinco años sobre una red de 30 pluviómetros distribuidos en todo el rancho y durante tres años en 7 cuencas representativas de diferentes tipos de materiales geológicos, permitieron establecer las principales características hidrológicas de la región. Por cada incremento de 100 metros de altitud, un incremento medio anual de 30 mm y un aumento de 5 días de lluvia caracteriza el régimen pluviométrico de la zona. De acuerdo a los registros pluviográficos, mas del 70 % de la lluvia se precipita en 30 minutos. El análisis de la repartición espacial mostró que el tamaño de la célula de una lluvia varia de algunos km² a varias decenas de km². Los eventos lluviosos mas extensos llegan a cubrir la totalidad del rancho.

La 7 cuencas estudiadas, con superficies que varían entre 0,1 y 5 km², presentaron coeficientes anuales de escurrimiento muy variables y poco significativos en 1996, año ligeramente superior a la mediana : 2 a 3.5 % sobre materiales calcáreos riolíticos o coluviales y menos de 0,5 % sobre basalto y conglomerado basáltico. A la escala de los eventos lluviosos, el análisis de las relaciones entre las laminas de escurrimiento y las variables pluviométricas mostró claramente la importancia de la intensidad en la génesis de los escurrimientos. Esto permito definir a la variable PUIL como la que mejor explica el escurrimiento a partir de un limite de intensidad (IL) representado por una función exponencial decreciente con un índice de lluvias anteriores (IK). El modelo hidrológico, seleccionado para reconstituir las laminas de escurrimiento, es un modelo global determinístico cuadrático de 5 parámetros. El empleo de este modelo nos permitió reconstruir 13 años de escurrimiento en tres cuencas seleccionadas, utilizando tanto los datos pluviométricos diarios de la estación Atotonilco (1971 - 1983) como las características pluviométricas regionales. Un análisis de componentes principales (ACP) de las variables descriptivas de las 7 cuencas y de los cinco parámetros asociados al modelo cuadrático, permitió el establecimiento de una tipología hidrológica de las cuencas. La comparación de esta tipología con las características de las 61 cuencas permitió a su vez la definición de las reglas de transposición del modelo cuadrático sobre la totalidad del rancho.

Los estudios realizados sobre el sistema de distribución del agua mostró que el agua almacenada en los presones, en condiciones actuales, es muy poco utilizada por el ganado. Solo 1.26 % sirvió para abrevar al ganado durante 1996 y 1997. La duración del agua en los bordos es muy corta; de 5 a 8 meses en 1996. Diversas modificaciones se proponen para incrementar el uso del agua en los presones. Estas pueden contribuir a la economía del consumo de combustibles, utilizados para la extracción del agua subterránea. La mas importante de esas modificaciones consiste en conectar los bordos a una parte de la red de distribución del agua, conformada de 280 abrevaderos, otras sugieren solamente el cambio de la forma del bordo y su impermeabilización. Estas modificaciones son analizadas, en varios ejemplos, dentro del contexto de administración del rancho.

REMERCIEMENTS

Avant de présenter les résultats de quatre ans de recherches réalisées au Mexique et en France, je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude aux instituts : en France l'IRD, au Mexique le CONACYT et l'INIFAP, qui ont collaboré à la réalisation de ce travail de thèse dans le cadre d'un programme hydrologique de recherche dans les zones subhumide et semi-aride du Nord-Mexique.

Cependant, mes remerciements s'adressent premièrement aux personnalités scientifiques qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail :

- Monsieur le professeur M. DESBORDES, responsable de la formation doctorale à l'Université de Montpellier II, président de mon jury de soutenance ;
- Monsieur P. LE GOULVEN, directeur de recherche à l'IRD, qui a accepté avec gentillesse la responsabilité scientifique de ce travail et qui m'a fait bénéficier de ses conseils enrichissants et d'une motivation qu'il a toujours su me transmettre ; trouve ici Patrick toute ma reconnaissance pour ton soutien ;
- Monsieur le professeur P. HUBERT, professeur à l'Ecole des Mines de Paris, qui, avec sa connaissance et son expérience dans le domaine de la gestion des eaux, m'a fait l'honneur d'être rapporteur de ma thèse ;
- Monsieur I. SANCHEZ C., directeur du CENID RASPA, qui a toujours appuyé ma formation dans le domaine de l'Hydrologie et qui m'a apporté, par son soutien et son amitié, les meilleures conditions de travail au Mexique pour mener à bien cette recherche ;
- Monsieur J.L. GONZALEZ B., chercheur au CENID RASPA, pour son soutien toujours chaleureux et son amitié, je le remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury.
- Je réserve une mention particulière à Monsieur J. M. LAMACHERE, chercheur à l'IRD, qui m'a fait bénéficier de sa connaissance et de son expérience dans le domaine de l'Hydrologie. Il a toujours su m'apporter les critiques et le recul dont j'avais besoin. Trouve ici, Jean Marie, tous mes chaleureux remerciements pour le long travail de critique et correction de cette thèse.

Je réserve également une mention particulière à Monsieur J. Y. LOYER, directeur de recherche à l'IRD, qui m'a fait bénéficier de sa grande expérience de terrain lors de longues journées de travail. Je te remercie vivement, Jean Yves, pour ton soutien et tes encouragements aux cours de ces longues années et pour ta participation à tous les niveaux de ce travail de thèse.

Je témoigne toute ma gratitude à Monsieur Jean ALBERGEL, responsable à l'IRD du programme de recherche « Petits Barrages », qui a toujours manifesté de l'intérêt pour mes travaux, et à Monsieur Henry POUPON, représentant de l'IRD en Mexique. Ils ont su mobiliser les moyens matériels et financiers, faciliter les formalités administratives pour la réalisation de cette thèse. Je remercie également Monsieur P. CHEVALLIER pour son accueil au Laboratoire d'Hydrologie à Montpellier pendant la dernière année de rédaction de cette thèse.

Je remercie d'une manière spéciale les propriétaires et gestionnaires du ranch Atotonilco pour avoir accepté gentiment l'installation des appareils pluviométriques et hydrologiques pour l'étude des petits barrages et pour avoir mis à notre disposition des locaux, facilitant ainsi notre travail de collecte des données. Qu'ils trouvent ici ma plus profonde gratitude et ma reconnaissance. Puissent ils trouver dans ma thèse la récompense de leur soutien.

Mes remerciements s'adressent également aux nombreuses personnes avec lesquelles j'ai eu l'occasion de travailler pendant ces quatre années de thèse. Je remercie en particulier Monsieur J. F. NOUVELOT pour ses critiques averties lors la révision du manuscrit et Luc DESCROIX pour son aide au début des travaux. Je remercie également Michèle et Jean-Pierre THIEBAUX pour leur aide pendant les travaux de terrain, aux cours des périodes de pluies; à tous les deux j'adresse mes sentiments les meilleurs.

Je ne pourrais non plus oublier les longues journées de travail passées sur le terrain avec C. SOTO et M. MONTES. Je remercie également les stagiaires mexicains qui m'ont accompagné sur le terrain en 1996 et 1997.

Merci également à mes collègues thésards et compagnons de bureau : Angeles, Angel, Benoît, Cécile, David, Ekasite, Geoffroy, Guillaume, Leonardo, Rana, Wenceslao.... pour leurs encouragements et leur patience pendant la rédaction de cette thèse.

Un grand merci à Ghislaine et Jean-Christophe POUGET ainsi qu'à Dominique DELSENY pour leurs amitiés et leurs soutiens pendant cette dernière année.

Je n'oublie pas tous ceux qui, au laboratoire d'Hydrologie de Montpellier, ont participé d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette thèse et qui ont contribué à l'enrichissement de mes connaissances dans le domaine de l'Hydrologie : H. LUBES, E. CADIER, J. TOUMA, C. BOUVIER, L. SEGUIS, B. CAPPELAERE, C. PEUGEOT, P. CARRE, B. THEBE, Y. LHOTE, ...

Je remercie également tous ceux qui m'ont facilité la tâche au laboratoire : P. RAOUS, E. RABBIA, J. O'SUGHRUE, C. PICQ, N. MUTHER, M. OI, B. JEANNY, J. P. DEBUICHE, A. CRESPIY, V. DURAND, M. DJELLOULI, ...

Je remercie aussi mes collègues mexicains qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant mon travail de thèse au Mexique : M. RIVERA, J. MARTINEZ, D. GARCIA, J. G. MARTINEZ, I. ORONA, C. EFREN, R. JASSO, L. MORENO, R. ANGUIANO, A. MARTINEZ, ...

Enfin, je remercie de tout mon coeur Alicia qui m'a toujours soutenu pendant ces longues années. Sans elle, il ne m'aurait pas été possible de réaliser ce travail de thèse. Je ne saurai trop te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. Que Karen et Juan trouvent en cette thèse la consolation de mes multiples voyages et de mes absences prolongées en souhaitant qu'elle puisse les leur faire oublier.

*A mi esposa Alicia,
A mis hijos, Karen L. y Juan R.*

SOMMAIRE

Résumé - Resumen - Abstract	3
Remerciements	7
Glossaire	11
Abréviations	13
INTRODUCTION	15
PREMIERE PARTIE	
LE RANCH ATOTONILCO DANS LA REGION HYDROLOGIQUE 36	
CHAPITRE 1 : Présentation de la Région Hydrologique 36 (RH36)	21
CHAPITRE 2 : Hydrologie de la RH36	31
CHAPITRE 3 : L'administration de l'eau dans la partie semi-aride de la RH36	43
CHAPITRE 4 : Le Ranch Atotonilco	49
DEUXIEME PARTIE	
LES SITES EXPERIMENTAUX : OBSERVATIONS ET DESCRIPTIONS	
CHAPITRE 5 : Sélection et description des sites expérimentaux	67
CHAPITRE 6 : Observations climatiques	85
CHAPITRE 7 : Mesures hydrologiques	107
Planches photographiques :	133
TROISIEME PARTIE	
ALIMENTATION EN EAU DES PETITES RETENUES	
CHAPITRE 8 : Modélisation de la lame ruisselée	139
CHAPITRE 9 : Analyse spatiale des données hydrologiques	167
CHAPITRE 10 : Validation, transposition et simulation	187
QUATRIEME PARTIE	
LES PETITS BARRAGES DANS LE RANCH ATOTONILCO	
CHAPITRE 11 : Fonctionnement des petits barrages (presones)	219
CHAPITRE 12 : La gestion de l'eau dans le ranch Atotonilco	243
CHAPITRE 13 : Rôles actuel et potentiel des petits barrages	261
CONCLUSION GENERALE	291
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	299
TABLES DES MATIERES	305
LISTE DES FIGURES	310
LISTE DES TABLEAUX	315
ANNEXES	323

GLOSSAIRE

<i>Aguajes</i>	grandes mares
<i>Altiplano</i>	haut plateau
<i>Arroyos</i>	petits cours d'eau temporaires
<i>Aurora</i>	formation géologique du crétacé inférieur constituée de roches calcaires et dolomitiques
<i>Bolsón</i>	dépression en zone désertique
<i>Caliche</i>	croûte calcaire qui se forme en aval de reliefs de commandement calcaires
<i>Cerro</i>	butte, colline
<i>Chaparral</i>	végétation arbustive basse formée de cactées et d'agaves
<i>Comarca Lagunera</i>	zone endoreique dans la partie aval du rio Nazas
<i>Ejidatarios</i>	paysans vivant dans les communautés villageoises
<i>Embolo</i>	piston d'une pompe
<i>Estado</i>	état mexicain équivalent à un département français
<i>Ejido</i>	propriété communautaire
<i>fracción</i>	quartier
<i>Jagüeyes</i>	mares
<i>Manguereros</i>	personnel chargé de la surveillance et des réparations du réseau de distribution des eaux
<i>Matorral</i>	végétation arbustive dense
<i>Medio riego</i>	irrigation de complément
<i>Merced</i>	propriété donnée aux conquistadores par la couronne d'Espagne à l'issue de la conquête de nouveaux territoires en Amérique latine
<i>Municipio</i>	commune
<i>Papalotes</i>	éoliennes
<i>Pilas</i>	gros réservoir de forme circulaire
<i>Presones (presón)</i>	petits barrages ou petites retenues
<i>Sierra</i>	chaîne de montagnes
<i>Suculentas</i>	plantes grasses
<i>Tanques</i>	barrages de moyenne importance
<i>Tartanas</i>	charrettes de transport de matériaux
<i>Toba</i>	roche acide d'origine éruptive, analogue à un tuf
<i>Vaqueros</i>	vachers

SIGLES et ABBREVIATIONS

CENID-RASPA	<i>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta y Atmosfera</i>
CIN	Commission d'Inspection du Nazas
CNA	Commission nationale de l'eau
COTECOCA	Programme mexicain d'inventaire des ressources végétales
FIT	Front InterTropical, zone de contact entre deux masses d'air en zone tropicale
INEGI	<i>Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática</i>
INIFAP	<i>Instituto Nacional de Investigación Forestal y Agropecuaria</i>
IRD	Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)
PEMEX	<i>Petróleos Mexicanos</i> (Société Pétrolière Mexicaine)
PROCEDE	Programme cadastral des <i>ejidos</i>
RH36	Région Hydrologique 36
SARH	<i>Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos</i>
SEMARNAP	<i>Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca</i>
UNAM	<i>Universidad Nacional Autónoma de México</i>

INTRODUCTION

Plus des deux tiers de la superficie du territoire mexicain sont soumis à une contrainte d'aridité climatique plus ou moins prononcée. Ces zones, localisées dans la moitié Nord du pays (figure 1), reçoivent moins de 500 mm de précipitations pluviales annuelles, dont la majeure partie, variable selon la latitude (80 % en moyenne), tombe en saison chaude. Sous ces climats intertropicaux, les eaux disponibles sont en outre fortement affectées par les températures saisonnières élevées qui ont une forte incidence sur l'évaporation et l'évapotranspiration des plantes et des sols.

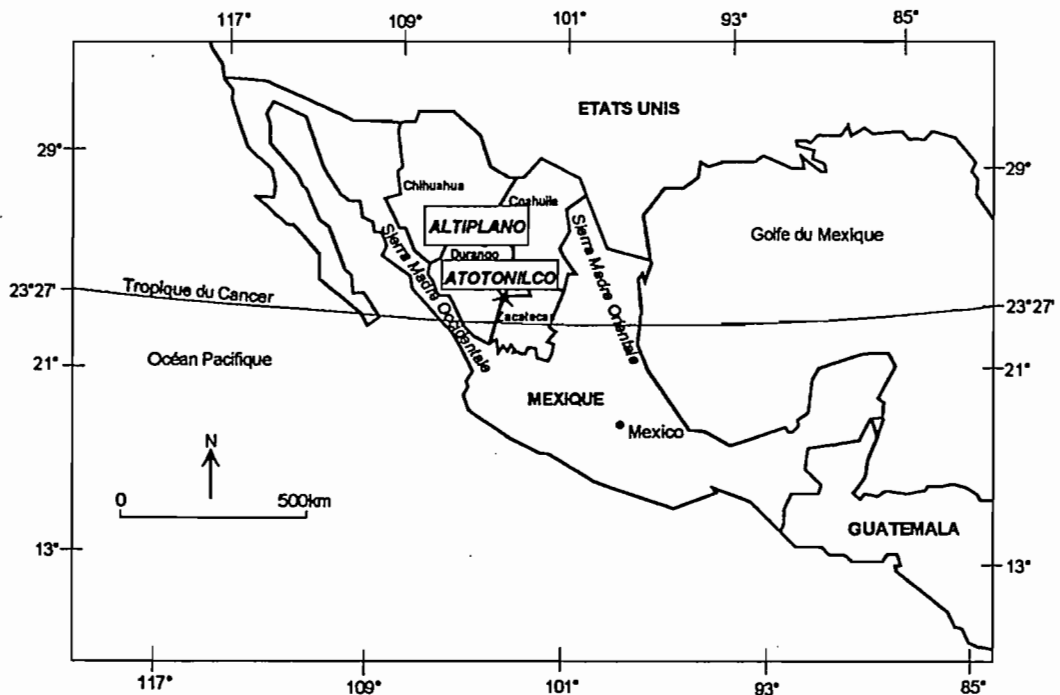


Figure 1. Présentation générale de la zone d'étude.

L'indice d'aridité ($R = P/ETP$) utilisé par l'UNESCO (1977) pour caractériser les climats à l'échelle du globe est, pour ces régions nord-mexicaines, inférieur à 0,50 ce qui rattache la majorité d'entre elles, plus particulièrement l'Altiplano, aux climats arides et semi-arides. Si un certain nombre de facteurs spatiaux ou temporels, comme l'altitude, la continentalité et la variabilité des pluies, interviennent pour modérer ou accentuer localement cette aridité, il n'en est pas moins vrai que la disponibilité en eau reste la contrainte, plus ou moins aiguë selon les situations, de tout développement agricole dans ces régions.

La Région Hydrologique 36 et le bassin versant du rio Nazas en particulier sont représentatifs de la plupart des situations climatiques reconnues sur cet Altiplano. Avec des gradients de continentalité et d'aridité croissant de l'amont vers l'aval, le bassin versant du rio Nazas se développe de la Sierra Madre Occidentale, où l'altitude dépasse 3000 m, jusqu'aux lagunes de la haute plaine endoreïque à 1000 mètres d'altitude.

Sur ce bassin versant, l'indice d'aridité définit trois types de climats : sub-humide / semi-aride ($0,35 < R < 0,50$), semi-aride pur ($0,20 < R < 0,35$) et aride ($0,15 R < 0,20$). Des limites sous-regionales en découlent. Elles ont été définies à partir des moyennes pluviométriques interannuelles. De cette aridité plus ou moins marquée, résultent une disponibilité hydrique et une utilisation agricole de l'eau spécifiques à chaque partie du bassin versant :

- production d'eau et utilisation forestière dans la partie montagneuse,
- transfert et captation pour des utilisations locales dans la partie intermédiaire,
- consommation d'eaux exogènes pour l'irrigation dans la partie basse.

Ce travail s'intéresse à la partie intermédiaire semi-aride du bassin versant, où la pluviométrie est de l'ordre de 450 mm en moyenne. Ces pluies permettent théoriquement la conduite de cultures pluviales, mais la forte variabilité pluviométrique qui affecte ces milieux rend la production céréalière très aléatoire sans irrigation. Les activités agricoles s'orientent donc vers l'élevage, qui, pour être rentable, doit rechercher et mettre en oeuvre des stratégies de gestion adaptées aux contraintes locales. C'est le cas du ranch Atotonilco sur lequel ont été implantés une soixantaine de petits barrages de captation et de rétention d'eau pour l'abreuvement du bétail.

Dans ce contexte de gestion des eaux superficielles, le travail présenté prétend répondre à un double objectif.

- Au plan hydrologique, il a pour but de comprendre les dynamiques hydriques superficielles spécifiques de ces milieux semi-arides nord-mexicains, continentaux chauds et secs. La démarche débute par l'analyse des précipitations pluviales et de leurs variabilités spatiale et temporelle à l'échelle des petits bassins versants qui forment les impluviums des petits barrages (*presones*), en relation avec leur organisation séquentielle (lithologies, morphologies, sols) et leur couverture végétale. Elle se termine par le calcul du bilan hydrique des retenues elles-mêmes.
- L'objectif se rapportant au développement est de déterminer des règles de gestion rationnelle et d'utilisation optimale de l'eau sous les conditions climatiques, physiques et biotiques qui sont celles d'un ranch d'élevage semi-extensif contrôlé au Nord Mexique.

La mémoire de thèse est constitué de 13 chapitres regroupés en 4 parties se rapportant à ces différents aspects:

- Le cadre physique et humain de la Région Hydrologique 36, de la sous région semi-aride et enfin du ranch Atotonilco lui même.
- Les observations effectuées sur les bassins versants et sur les parcelles expérimentales : pluies, évaporation, écoulements, caractéristiques physiques et biotiques (végétation).
- L'analyse et la modélisation du ruissellement à l'échelle des bassins versants, la validation et la transposition des résultats.
- Le bilan hydrique des petits barrages et leur rôle dans l'abreuvement du bétail.

PREMIERE PARTIE

LE RANCH ATOTONILCO DANS LA REGION HYDROLOGIQUE 36

**CHAPITRE 1 : Présentation de la Région Hydrologique 36
(RH36)**

CHAPITRE 2 : Hydrologie de la RH36

**CHAPITRE 3 : L'administration de l'eau
dans la partie semi-aride de la RH36**

CHAPITRE 4 : Le Ranch Atotonilco

CHAPITRE 1

PRESENTATION DE LA REGION HYDROLOGIQUE 36 (RH36)

1.1. Situation Géographique

Selon la régionalisation effectuée par le SEMARNAP¹ et la CNA², le territoire mexicain est découpé en 37 Régions Hydrologiques (Figure 1.1). La Région Hydrologique 36 (RH36), avec ses voisines : RH35 au Nord, RH37 au Sud, est l'une des trois régions endoréiques mexicaines. Elle est constituée de deux grands bassins versants : les bassins du rio Nazas et du rio Aguanaval. Localisée au nord et au centre du pays (Figure 1.1), entre les latitudes 22°40' et 26°30' nord et les longitudes 101°30' et 106°20' ouest, elle couvre une superficie totale de 92 000 km² répartie entre les états de Durango, Coahuila et Zacatecas.

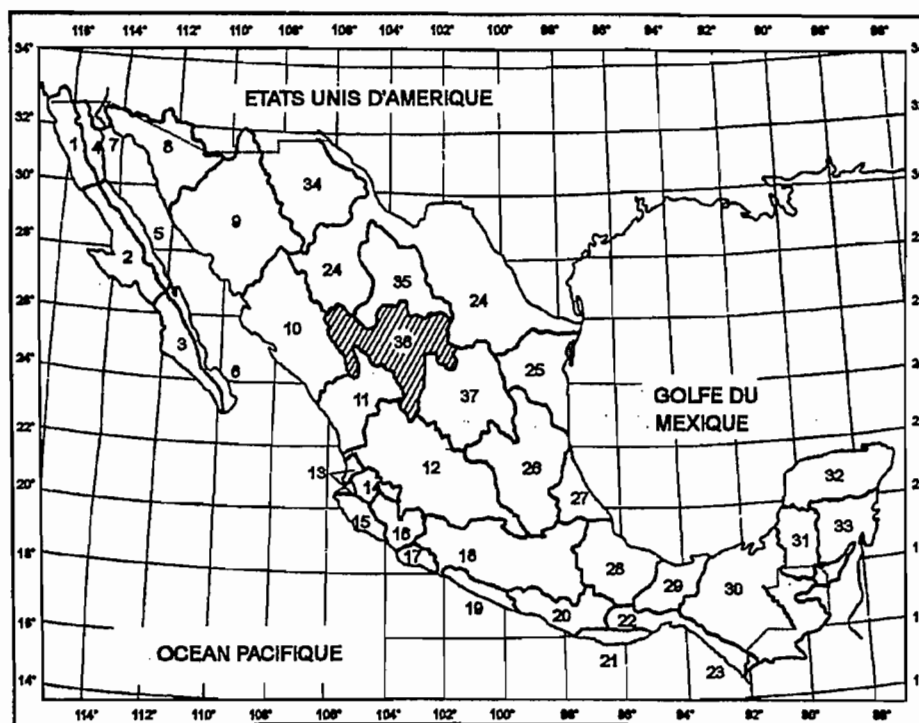


Figure 1.1 : Localisation de la RH36.

¹ Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca.

² Comisión Nacional del Agua.

D'une superficie de 55 377 km², elle s'étend de la Sierra Madre Occidentale à l'ouest, qui culmine à 3130 m d'altitude et lui procure la majeure partie de ses eaux superficielles, jusqu'aux lagunes de Mayrán (rio Nazas) et de Viesca (rio Aguanaval) situées dans sa partie est (figure 2.1). Les deux tiers de son étendue sont constitués de versants aux pentes plus ou moins accentuées. Les eaux superficielles, collectées sur ces versants, débouchent dans la haute plaine alluviale de la *Comarca Lagunera* située à 1100 mètres d'altitude. Réceptrice de la plupart des écoulements de surface et des écoulements souterrains, cette haute plaine irriguée constitue la zone agricole la plus importante de la RH36 (2 500 km²). Autrefois cotonnière, la *Comarca Lagunera* est aujourd'hui devenue, grâce aux cultures fourragères intensives, le plus grand bassin laitier du Mexique.

Le ranch Atotonilco, site de notre étude se trouve très précisément dans la partie médiane de la RH36, sur les reliefs qui bordent vers l'ouest la Comarca Lagunera.

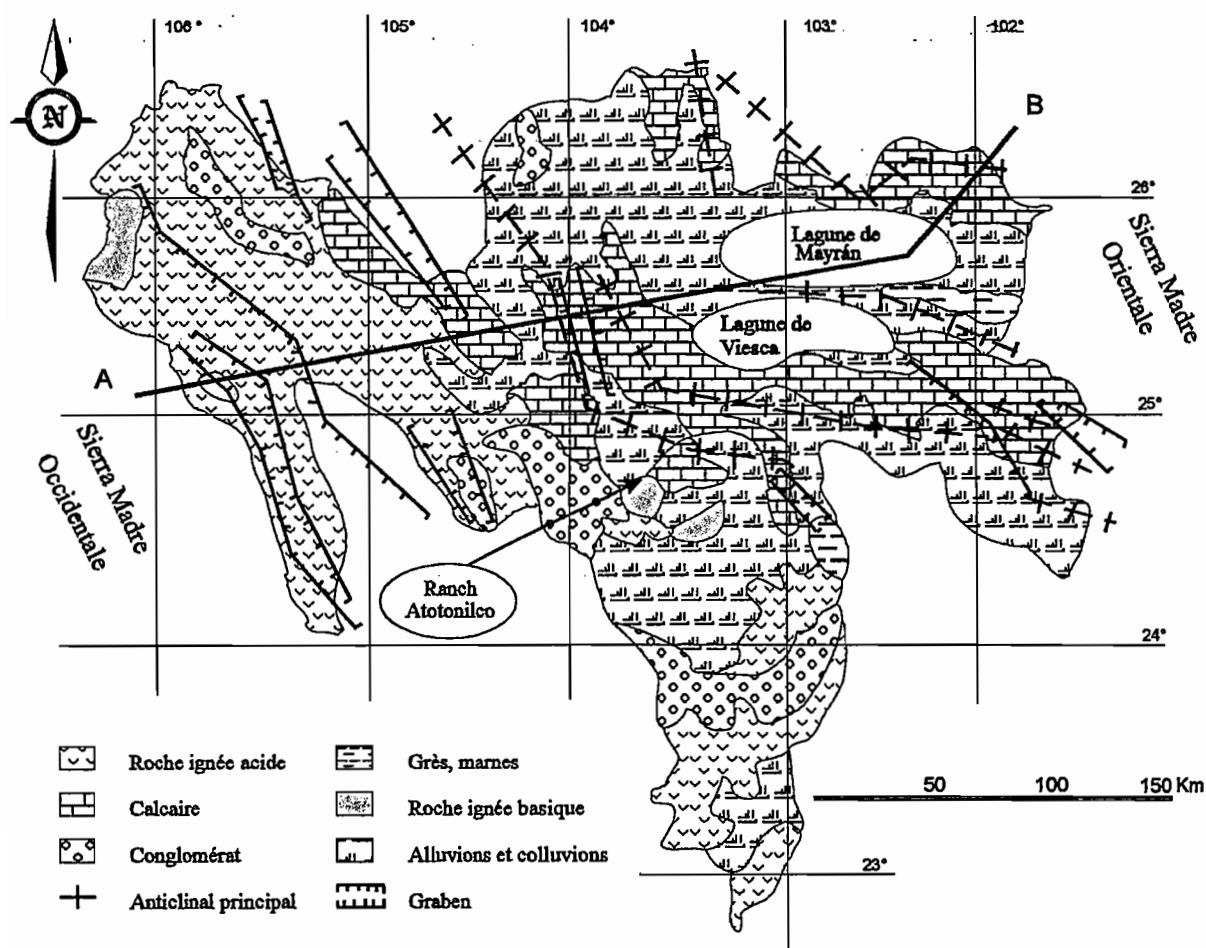


Figure 1.2 : Géologie de la RH36.

1.2. Description du milieu physique

1.2.1. Géologie et Géomorphologie

La partie centrale du Nord-Mexique est constituée d'un haut plateau (*Altiplano*), limité à l'ouest par la Sierra Madre Occidentale et à l'Est par la Sierra Madre Orientale, dont l'orientation générale est de direction NNO-SSE (Figure 1.2.).

La Sierra Madre Occidentale, d'âge tertiaire, est composée par un empilement de roches éruptives dont la épaisseur est de l'ordre de 3 000 mètres. Sa surrection a provoqué le plissement des roches et matériaux sédimentaires d'âge secondaire, ainsi que l'émergence de massifs éruptifs (basaltes). Les roches éruptives acides (rhyolites et ignimbrites) et pyroclastiques ("*toba*") forment la partie ouest du bassin versant du rio Nazas. Sa limite ouest coïncide avec la ligne de partage des eaux entre l'Océan Pacifique et le haut plateau endoréique du Nord-Mexique. Des tables et corniches rhyolitiques, parfois basaltiques, forment les plus hauts sommets de la Sierra Madre Occidentale. La *toba* recouvre le tiers supérieur de la RH36 dans les hauts bassins versants du rio Nazas et du rio Aguanaval. C'est une roche éruptive très hétérogène, formée de tufs, de brèches et d'argiles.

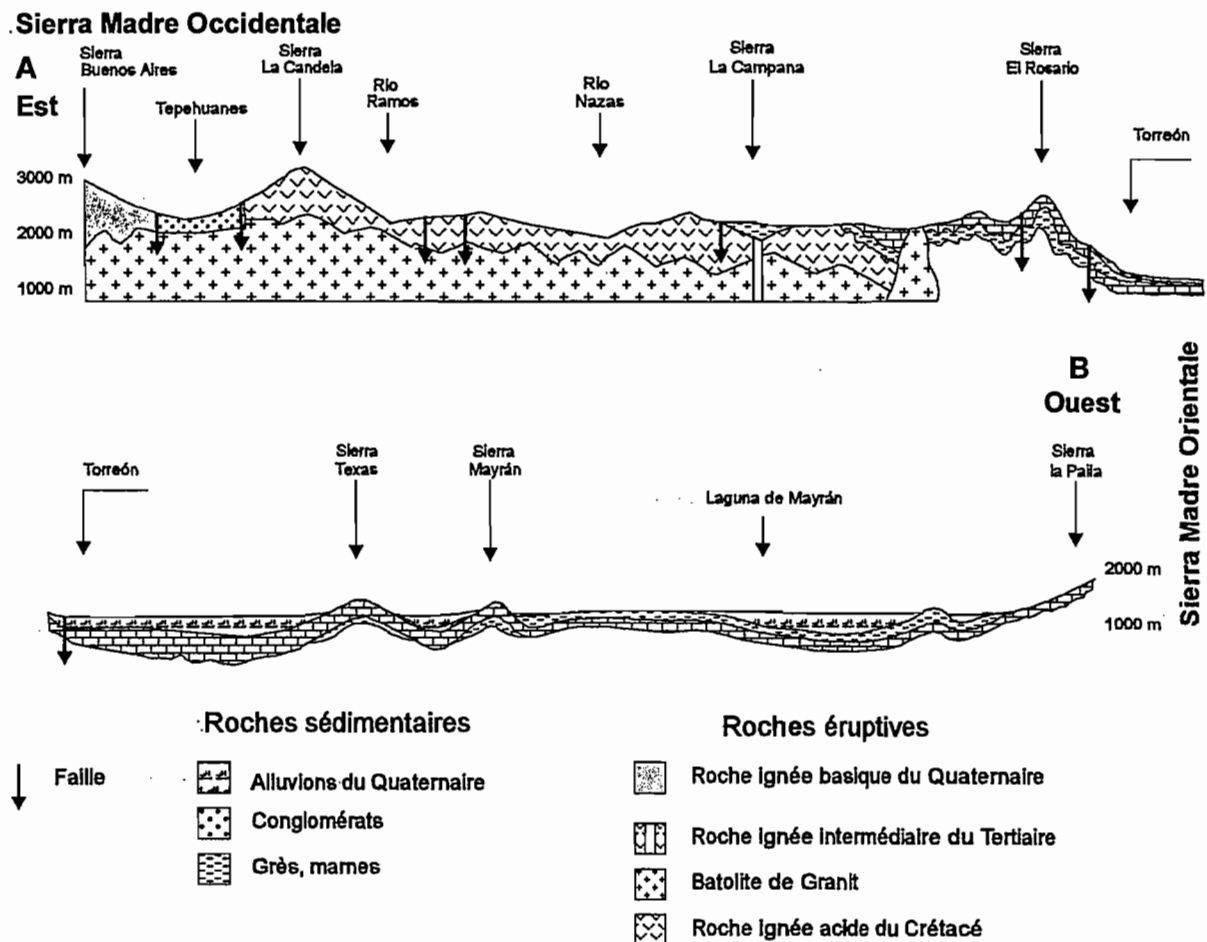


Figure 1.3 : Coupe géologique de la RH36 (Loyer 1993).

Le relief de la RH36 s'organise en relation avec la tectonique de surrection et de plissement qui s'accompagne de nombreuses fractures. Au contact éruptif-sédimentaire, ces fractures sont souvent minéralisées et elles donnent lieu à une intense activité minière. Les failles sont en majorité d'âge Pliocène ou post-Pliocène. Elles délimitent des horsts et des grabens, tels que celui du río Santiago dans le haut bassin du Nazas, en bordure desquels de nombreux conglomérats ont été protégés de l'érosion et affleurent aujourd'hui en chapelets de collines plus ou moins accolées aux versants montagneux (région de Tepehuanes, haut Nazas, figure 1.3). Certains réseaux de failles sont plus tardifs (Quaternaire) et sont contemporains de phénomènes volcaniques qui se sont produits dans la partie haute à l'ouest de la RH36 (roches éruptives basiques).

La partie sédimentaire de la Région est constituée de matériaux détritiques fins (lutites ou marnes), moyens (grès) ou grossiers (conglomérats). Elle est également constituée de matériaux d'origine chimique tels que les calcaires d'âges Jurassique et Crétacé, parfois interstratifiés avec les lutites. Les calcaires affleurent sous forme de massifs allongés de direction NNO-SSE dans la partie médiane, O-E dans la partie basse où ils affleurent également en îlots (*cerros*). A la fin du tertiaire, ces massifs ont été affectés par des fractures qui délimitent des horsts, tel que celui de la sierra del Rosario dans la partie basse du bassin de l'Aguanaval, ou bien des bassins d'effondrement comme les lagunes.

1.2.2. Le Climat

Généralités

Le climat du Nord-Mexique, plus particulièrement celui de la RH36, partie méridionale du Nord-Mexique, est influencé par la proximité du tropique du Cancer. Il est défini à la fois par la circulation zonale, par les reliefs et par la remontée des eaux froides du courant de Californie. La circulation zonale est sous la dominance des hautes pressions subtropicales. Les reliefs de la sierra Madre Occidentale font obstacle à l'entrée des flux humides en provenance du Pacifique et les eaux froides du courant de Californie assèchent l'atmosphère en longeant les côtes de la Basse-Californie mexicaine (Nouvelot et Descroix, 1996).

- ♦ De décembre à février, les hauts plateaux (*altiplano*) et le littoral du Pacifique sont soumis au régime des hautes pressions : les vents d'est, dominants à ces latitudes, pénètrent la zone côtière atlantique (figure 1.4 A). À cette époque de l'année, le courant de Californie a ses limites les plus méridionales.
- ♦ De juin à août, les hautes pressions se déplacent vers le nord (figure 1.4B) en stationnant sur l'extrême nord-ouest du Mexique et le sud-ouest de la Californie américaine ainsi que sur le désert côtier. Des flux d'air humide peuvent alors envahir l'*altiplano* mexicain (Santibañez 1992; Cornet 1988; Delhoume 1995). De cette manière, les masses d'air provenant du golfe du Mexique créent une instabilité propice à des pluies de convection. Ces masses d'air rencontrent celles du Pacifique à hauteur de la Sierra Madre Occidentale en formant le Front Tropical Mexicain (FTM, figure 1.4B), générateur des phénomènes convectifs les plus fréquents. Dans la partie centrale du Nord-Mexique, sur le versant

oriental de la Sierra Madre Occidentale, où se situe le ranch Atotonilco, les précipitations ont tendance à diminuer.

- ♦ A partir de fin août, les cyclones formés sur le Pacifique peuvent passer la barrière naturelle de la Sierra Madre Occidentale et retomber sur les zones arides et semi-arides. Les cyclones formés sur l'Atlantique se dirigent plutôt vers le Texas et la côte nord du golfe du Mexique.

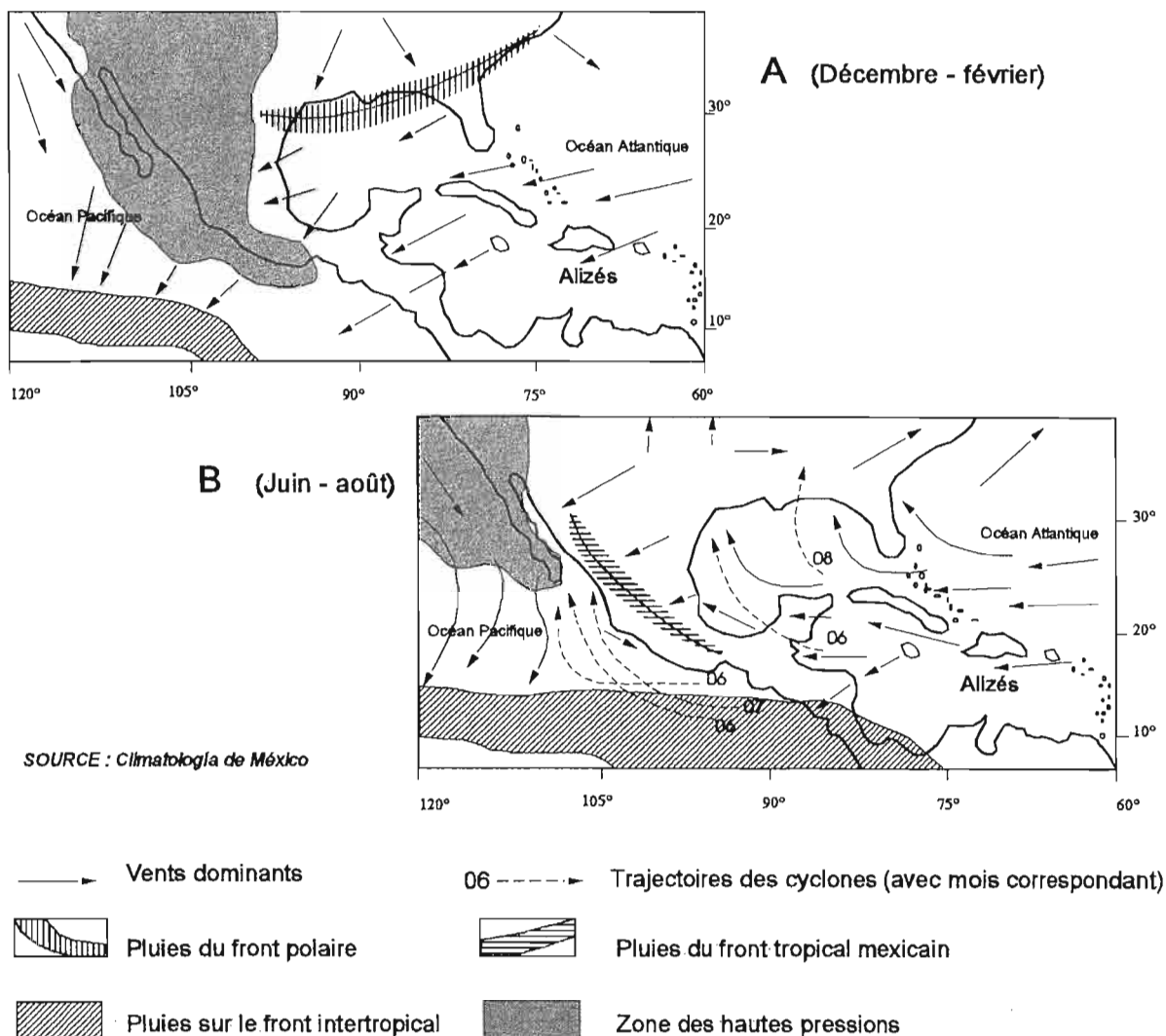


Figure 1.4 : Climatologie du Mexique.

La pluviométrie

L'analyse de la pluviométrie annuelle de la RH36 par la Méthode du Vecteur Régional (Hiez 1977; Hiez et Cochonneau 1992), appliquée aux 123 stations pluviométriques de la région, a permis de différencier trois sous-régions pluviométriques (figure 1.5, Descroix *et al.* 1997) :

- 1) la zone subhumide comprenant la Sierra Madre occidentale et les plateaux de l'état de Durango où la pluie moyenne annuelle est supérieure à 500 mm,
- 2) la zone semi-aride comprenant le piémont oriental de la Sierra Madre et le plateau du bassin de l'Aguanaval où la pluviométrie est comprise entre 300 et 500 mm,
- 3) la zone aride formée des lagunes Máyan et Viesca et du *Bolsón* de Mapimí, où la pluie annuelle moyenne est inférieure à 300 mm.

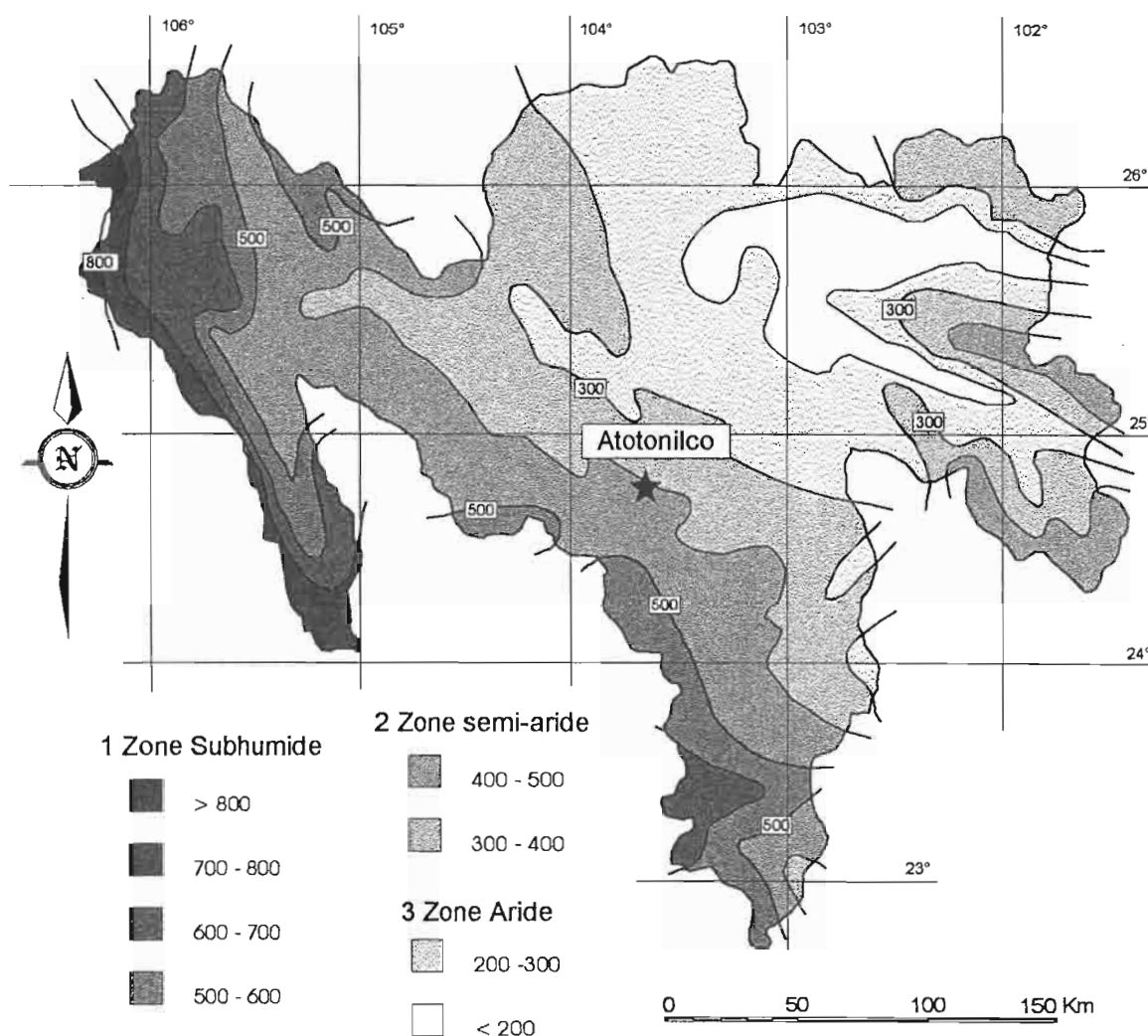


Figure 1.5 : Pluviométrie de la RH36.

Pour la zone aride, l'indice de proportionnalité de la Méthode du Vecteur Régional est égal à 0,23. Cette valeur ne satisfait donc pas à l'hypothèse de pseudo-proportionnalité car la variabilité spatio-temporelle de la précipitation y est très forte et on observe des écarts pluviométriques importants, même pour des stations rapprochées.

En année moyenne, la pluviométrie de la RH36 décroît de plus de 800 mm dans la Sierra Madre Orientale, où l'altitude atteint 3 000 mètres, à 200 mm sur les lagunes endoréiques à 1 100 mètres d'altitude. Cette répartition spatiale de la pluie s'explique bien (83 % de la variance) en considérant deux facteurs explicatifs : l'altitude d'une part et la distance à l'océan Pacifique d'autre part (Estrada *et al.* 1993 ; Nouvelot *et* Descroix 1996). Ces deux facteurs sont très dépendants : en même temps que l'altitude baisse vers les lagunes endoréiques, la distance à l'océan s'accroît. Une étude de la relation entre la pluie et l'altitude, faite à partir de 60 stations pluviométriques, a montré un gradient d'altitude voisin de 30 à 35 mm de pluviométrie annuelle pour 100 m de dénivelé (Garcia 1993).

La répartition mensuelle des précipitations présente une grande homogénéité sur l'ensemble de la RH36. Nouvelot *et* Descroix (1996) ont mis en évidence, par la méthode dite du Classement Ascendant Hiérarchique (CAH), un profil type caractérisé par une saison des pluies estivale bien marquée qui s'étend de juin à septembre. Cette saison, avec un maximum en août, cumule 78 % de la pluie totale annuelle (figure 1.6), tandis que les pluies d'hiver ne dépassent pas 8 % de ce même total.

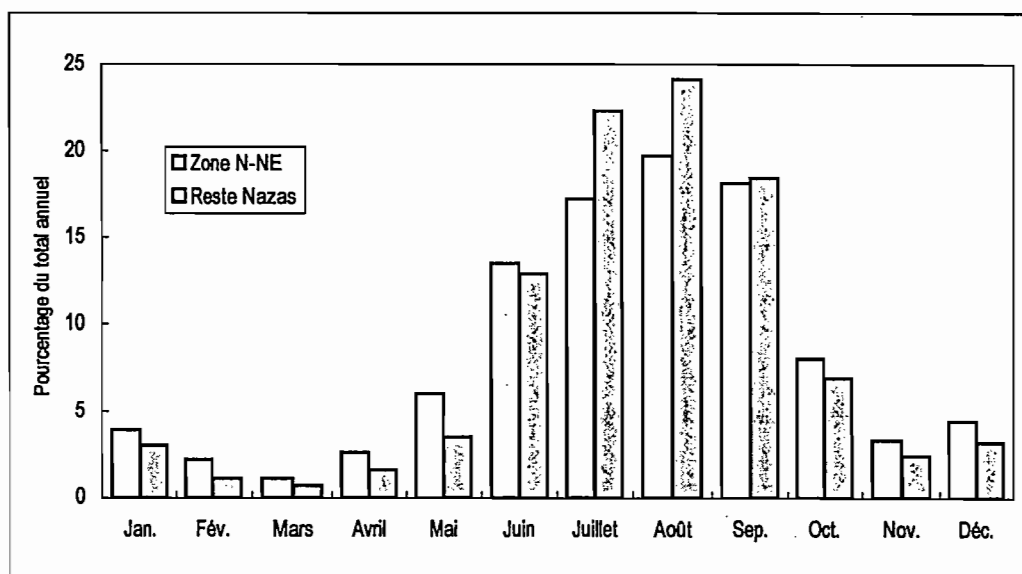


Figure 1.6 : Distribution mensuelle des précipitations en pourcentages du total annuel.

Sur l'ensemble de la Région, le nombre de jours de pluie (pluies supérieures à 0,1 mm) augmente avec la hauteur des précipitations annuelles. En fonction de la hauteur précipitée, la répartition du nombre de jours de pluie est la même quelle que soit la zone considérée (Nouvelot *et* Descroix 1996).

Une analyse des phénomènes de persistance par autocorrélation a montré que la pluie journalière dépend des précipitations tombées les jours précédents. Le schéma de Polyà, utilisé pour estimer la propagation contagieuse des maladies, s'adapte bien aux chroniques pluviométriques de la région. Le facteur de persistance du schéma de Polyà décroît avec la pluie annuelle : il est égal à 2,26 pour une pluie de 600 mm, 1,25 pour 400 mm et 0,22 pour 200 mm (Descroix *et al.* 1997). Il faut rappeler qu'un facteur de persistance égal à zéro signifie que les pluies journalières sont indépendantes.

Températures

Dans la RH36, la température varie essentiellement avec l'altitude. La température moyenne annuelle oscille entre 8°C dans la partie haute de la Sierra Madre occidentale (3 000 m) et 24°C à l'intérieur des lagunes endoréiques des rios Nazas et Aguanaval (1 100 m). García (1993) a montré une variation plus forte du gradient thermique altitudinal dans la partie haute que dans la partie basse de la Région avec :

- ♦ une variation de 0,62° C pour 100 m dans la partie haute,
- ♦ une variation de 0,43° C pour 100 m dans la partie basse.

La distribution mensuelle de la température varie en fonction de la saison : les températures les plus élevées s'observent au printemps en saison sèche (mois de mai et juin) dans la partie basse, avec des maximums journaliers qui peuvent dépasser 40° C ; les températures les plus basses peuvent descendre à -10°C en hiver (mois de décembre et janvier) dans la partie haute de la Sierra Madre Occidentale.

Evapotranspiration

Dans la partie basse de la RH36, l'évapotranspiration réelle (ETR) a été estimée par l'INEGI¹ en utilisant la méthode de Thornthwaite (1954). Elle comprise entre 200 et 300 mm par an. Sur plus de 60 % de la superficie de la partie haute, l'ETR peut varier de 400 à 600 mm (García, 1993).

L'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) dépasse largement les précipitations. Dans la zone basse lagunaire, où se trouve la région agricole la plus importante de la RH36, l'ETP de la luzerne, principal aliment des vaches laitières, peut atteindre 2 000 mm par an, ce qui représente dix fois la précipitation moyenne annuelle de la zone. Pour la même période et la même région, l'évaporation du bac classe A peut dépasser 2 500 mm avec un écart-type de 200 mm (González *et al.* 1995; García 1993).

¹ Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

1.2.3. Sols et occupation des sols

Treize unités de la classification FAO/UNESCO des sols sont représentées dans la RH36. Les unités les plus importantes sont : les Lithosols (35 % de la superficie totale), les Xérosols (20 %), les Féozems (13 %). Ces trois unités couvrent à elles seules plus de 65 % de la superficie de la Région. D'autres unités, moins importantes, Rendzina, Régosol, Solonchak, Castañozem et Yermosol, couvrent environ 25 % de cette même superficie.

Rivera Gonzalez (1993) a estimé la capacité au champ, humidité volumique entre les potentiels de succion de 0,3 et 15 bars, pour chacune de ces unités de sols en fonction de leur texture et de leur profondeur à partir de la formule de Rawls et Brakensiek (tableau 1.1). Les trois unités les plus représentées, Xérosols et Féozems peuvent stocker en moyenne, sur un mètre de profondeur, respectivement 260 à 225 mm d'eau. Par contre, en moyenne, les Lithosols ne stockent qu'environ 10 mm.

Tableau 1.1. Capacité au champ et profondeur moyenne des unités de sol dans la RH36.

Unités de sol	Profondeur	Texture	Profondeur (m)	Capacité au champ %
Lithosol	Très superficielle	Grossière (Gr)	0,1	25
Xérosol	Forte	Moyenne	+ de 1,0	26
Féozem	Moyenne-Forte	Moyenne-Fine	0,5 à 1,0	31
Régosol	Superficielle -Moyenne	Gr.-Moyenne	0,2 à 0,5	24
Castañozem	Forte	Gr.-Fine	+ de 1,0	26
Rendzina	Superficielle	Gr.-Moyenne	0,2	25
Yermosol	Forte	Moyenne-Fine	+ de 1,0	27
Solonchak	Forte	Moyenne-Fine	+ de 1,0	27
Cambisol	Moyenne-Forte	Gr.-Fine	0,5 à 1,0	27
Fluvisol	Forte	Grossière	+ de 1,0	16
Chernozem	Forte	Moyenne	+ de 1,0	33
Vertisol	Forte	Fine	+ de 1,0	30
Solonetz	Forte	Fine	+ de 1,0	19

L'occupation des sols peut être regroupée en cinq types différents : Forêt, *Chaparral*, *Matorral xérophile*, Pâturages et cultures. Les principales caractéristiques de ces groupes végétatifs sont les suivants :

- ♦ La forêt est définie comme un groupe végétatif d'arbres hauts, généralement de densité forte et uniforme, composée essentiellement de pins et de chênes. Elle est développée en altitude sur sols de profondeur faible à moyenne (Lithosols, Féozems).
- ♦ Le *Chaparral* est une végétation caractéristique du Nord-Mexique et du sud des Etats-Unis. Il est formé par une végétation arbustive basse d'espèces latifoliées, de cactus (*Opuntia*) et d'*Agaves*, espèces résistantes au feu qui peuvent se développer sur sols peu épais (Rendzina).

- ♣ Le *Matorral xérophile* est une formation végétale arbustive plus dense que le *Chaparral*, formée d'espèces adaptées à l'aridité. Il est très représentatif des zones arides et semi-arides de la RH36. Il se développe principalement sur Xérosols et Yermosols.
- ♣ Le groupe végétal des pâturages se caractérise par la prédominance des graminées qui peuvent dépasser 60 cm de hauteur. L'appellation pâturage est aussi attribuée à des unités exploitées pour l'élevage. Leur état de dégradation mériterait plutôt l'appellation de parcours. Cette formation végétale se développe sur tous les types de sols.
- ♣ Les superficies cultivées couvrent 11 % de la région (10 000 km²) : environ 9 000 km² de cultures pluviales, constituées essentiellement de maïs et des haricots, et 1 200 km² de cultures fourragères et maraîchères irriguées (Voisin et Orona 1993).

Tableau 1.2. Distribution des principaux groupements végétaux de la RH36 (Tarin 1993).

Formation végétale	Superficie km ²	Pourcentage
Forêt	13 558	14,9
Chaparral	2 547	2,8
Matorral xérophile	52 543	57,8
Pâturage	11 376	12,5
Agriculture	10 199	11,2
Sans végétation	688	0,8

1.3. Position du ranch Atotonilco dans la RH36

Le ranch Atotonilco, zone étudiée dans cette thèse, est consacré entièrement à l'élevage extensif. Il se localise dans la partie médiane de la RH36 en limite sud du sous-bassin versant du Cañon Fernandez. Son altitude moyenne est de 1 800 mètres. Sur la figure 1.2, il est placé sur la ligne de contact entre les matériaux éruptifs (massifs basaltiques, roches rhyolitiques) et sédimentaires (calcaires et conglomérats).

Avec une précipitation moyenne annuelle de 400 mm, le ranch Atotonilco appartient à la région semi-aride de la RH36 (figure 1.5). Ses principales caractéristiques climatiques sont : une saison estivale des pluies, une baisse importante des températures en hiver et une évaporation annuelle comprise entre 2 000 et 2 500 mm.

Les pâturages herbeux naturels, associés à une végétation arbustive secondaire, constituent la principale unité végétale du ranch (84 % de sa superficie). Le pâturage herbeux sans végétation arbustive et le pâturage associé au matorral constituent les deux autres principales formations végétales.

Les principaux types de sols, dans le ranch Atotonilco comme dans la RH36, sont des Lithosols sur matériaux basaltiques, rhyolitiques et calcaires. Ils se caractérisent par une profondeur faible ou nulle et une très faible capacité de stockage des eaux de pluie.

CHAPITRE 2

HYDROLOGIE DE LA RH36

2.1. Les eaux superficielles

Le réseau hydrographique de la RH36 (figure 2.1) comprend trois bassins endoréiques : le bassin du río Nazas (50 500 km²), le bassin du río Aguanaval (33 500 km²) et le bassin de la cuvette (*Bolsón*) de Mapimí (7 500 km²).

- ♦ Le río Nazas est formé par la confluence des rios Ramos et Sextin; son cours inférieur se perd dans la Lagune de Mayrán après un trajet long de 220 km; son réseau hydrographique a une orientation générale est-ouest.
- ♦ Le cours du río Aguanaval, long de 305 km, se termine dans la Lagune de Viesca, la partie la plus basse de la RH36 (1 100 m); son réseau hydrographique a une orientation générale sud-nord.
- ♦ Le bassin du *Bolsón* de Mapimí comporte un système hydrographique diffus et inorganisé; ses écoulements sont utilisés localement pour l'irrigation en dérivant l'eau des thalwegs vers les zones basses les plus propices à l'agriculture.

Ces trois bassins ont un régime d'écoulement intermittent : une période de crues, juin à septembre, et une période d'étiages très marqués, octobre à mai. Des écoulements hivernaux (décembre, janvier) peuvent être observés mais ils ne sont pas significatifs par rapport aux écoulements estivaux.

La RH36 a été découpée en 13 sous-bassins à partir d'un réseau de 10 stations hydrométriques gérées par la CNA : six dans le bassin du río Nazas et quatre dans celui de l'Aguanaaval (Cf. figure 2.1). Le régime de ces sous-bassins montre un comportement hydrologique classique des régions semi-arides du Nord-Mexique : une zone montagneuse produit la plupart des écoulements (89 % selon Descroix *et al.* 1993); une zone intermédiaire de transfert et de faible production; une zone basse de stockage naturel dans de vastes réservoirs superficiels (lagunes) et souterrains (nappe alluviale).

En année moyenne, le volume écoulé est voisin de 1 100 millions de m³ pour le bassin du río Nazas et de 280 millions de m³ pour celui de l'Aguanaval. Les débits moyens annuels spécifiques de ces bassins décroissent de l'amont vers l'aval. Ainsi, pour le bassin du río Nazas, le débit moyen annuel passe de 2,3 et 2,45 l/s/km² pour les sous-bassins de Salome Acosta (2) et Sardinas (1), à 0,98 l/s/km² pour le sous-bassin de Cañon Fernández (5).

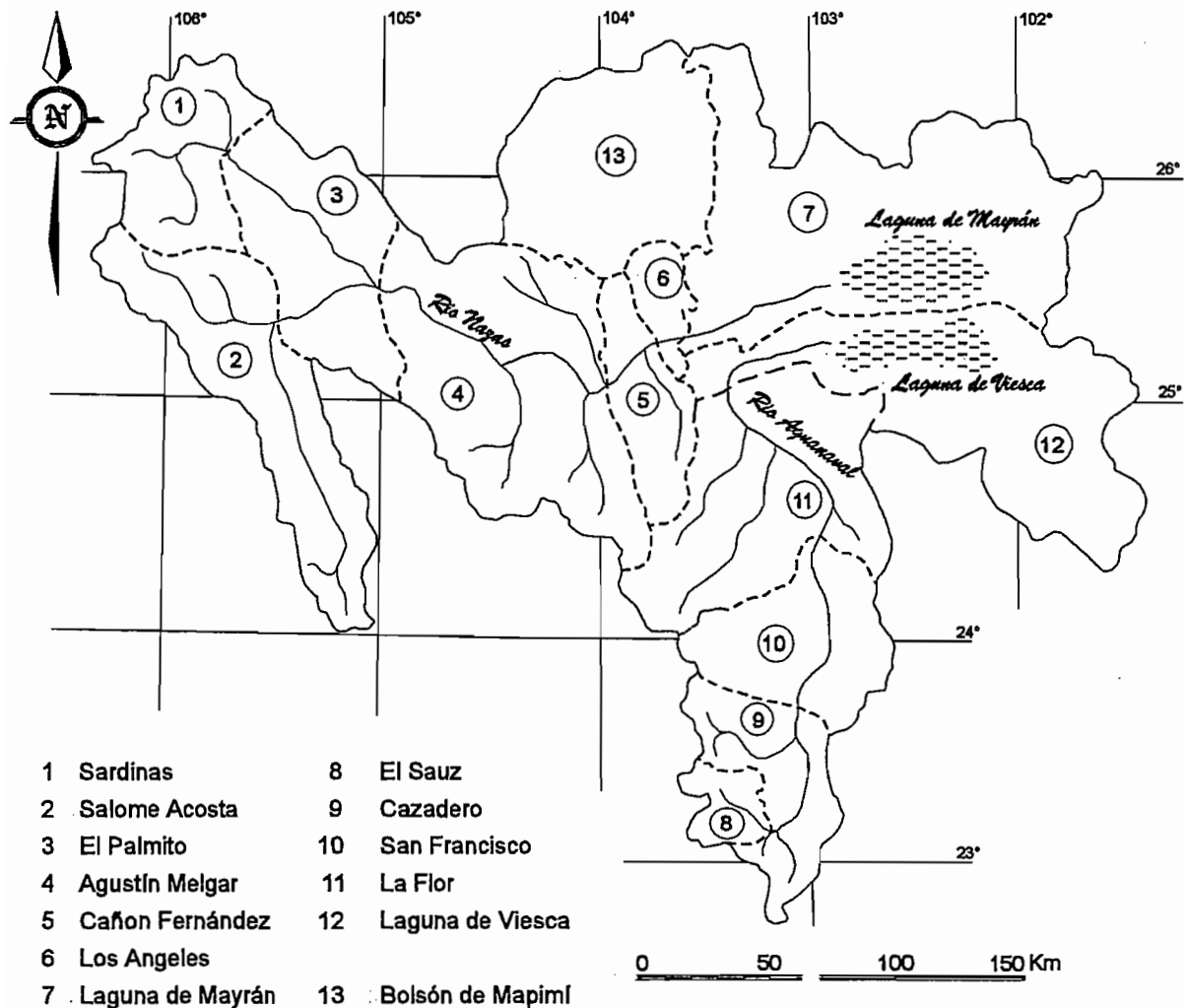


Figure 2.1. Réseau hydrographique de la RH36.

2.2. Utilisation des eaux superficielles

2.2.1 La dérivation des écoulements

L'utilisation des écoulements a commencé en 1840 dans la RH36 avec la construction de canaux de dérivation rudimentaires le long des cours du Nazas et de l'Aguanaval. A cette époque, la terre était répartie en grandes propriétés (*latifundia*) dont la majeure partie était consacrée à l'élevage. Les canaux permettaient la dérivation des crues estivales (juin à septembre) vers de petites zones de cultures (Rigal, 1988). Au fil des années, les terres ont été commercialisées pour former de nouvelles haciendas dont l'exploitation était assurée directement par leurs propriétaires ou indirectement par des fermiers (régime de fermage). Ces nouvelles propriétés durent améliorer la maîtrise de l'eau. Dès 1849, les premiers aménagements importants de dérivation de l'eau furent construits à des fins agricoles. Malgré une augmentation constante du nombre de ces structures, aucun projet réel d'aménagement n'a été conçu à l'échelle du bassin versant lui-même. Les haciendas, appartenant dans la plupart des cas à des étrangers ou gérées par des compagnies américaines, ont recherché leur propre autonomie d'alimentation en eau en utilisant de grands canaux pour profiter au maximum des crues du río Nazas. Les premiers problèmes de distribution d'eau sont alors apparus et se sont progressivement amplifiés entre propriétaires riverains.

En 1891 fut créée la Commission d'Inspection du Nazas (CIN) qui eut pour mission de réglementer la distribution de l'eau, ce qu'elle fit jusqu'en 1936, année de la réforme agraire. Cette réforme eut pour objectif de répartir la terre entre les paysans. Dans la RH36, principalement dans les zones basse et intermédiaire du bassin, cinq très grandes propriétés furent divisées pour former environ 3 000 *ejidos*² et de nombreuses petites propriétés. De ce fait, les droits d'eau réglementés au départ par la CIN furent transmis aux assemblées *ejidales* et aux petits propriétaires, obligeant le gouvernement à instaurer un régime plus rationnel et plus équitable d'utilisation de l'eau.

2.2.2 Le stockage des écoulements

Pour gérer les écoulements du río Nazas et de l'Aguanaval, l'action la plus importante de l'Etat a été la construction du barrage Lazaro Cardenas (*El Palmito*) sur le cours du haut Nazas à la confluence des rios Ramos et Sixtín (figure 2.2). Commencé en 1936, sa mise en service est intervenue en 1946. Le stockage des écoulements par la retenue, dont la capacité initiale était de 3,8 milliards de m³, a permis d'une part d'éviter les inondations des villes situées à l'aval, et d'autre part une meilleure répartition de l'eau pour un usage presque exclusivement agricole dans la partie basse. Actuellement, 81 % des réserves en eau sont utilisées par les communautés *ejidales* et 19 % par les petits propriétaires.

En aval du barrage, la nécessité de réguler les réserves d'une manière plus souple et la possibilité d'utiliser des apports non négligeables en provenance de la partie moyenne du bassin versant ont incité le gouvernement à construire en 1966, 200 kilomètres plus en aval, le barrage de Francisco Zarco. Le but de cet ouvrage est de stocker les écoulements de la partie moyenne du bassin versant, de réguler les apports d'eau pour l'agriculture et d'éviter les inondations dans les

² Propriétés communautaires

villes de Torreón et Gómez Palacio (figure 2.2). Mis en eau en 1968, sa capacité initiale de stockage était de 300 millions de m³. Quelques années après, sa capacité de stockage est passée à 420 millions de m³ par rehaussement de la digue.

Les écoulements de l'Aguanaval, beaucoup moins importants que ceux du río Nazas, ont commencé à être gérés dès 1905 avec la construction de barrages de moyenne importance à vocation agricole : le barrage Santa Rosa sur le río Trujillo (14 millions de m³), le barrage Leobardo Reynoso sur le río Los Lazos (74 millions de m³), le barrage Los Naranjos sur le río Santa Clara (31 millions de m³) et le barrage El Cazadero sur l'Aguanaval lui-même (27 millions de m³). Plusieurs autres petites retenues de moindre capacité (1 à 2 millions de m³) ont été construites sur des affluents. Tout ce réseau de barrages a favorisé une utilisation locale de l'eau et permis le développement de nombreux villages agricoles sur l'ensemble du bassin versant (figure 2.2), ce qui n'est pas le cas pour celui du Nazas dont les écoulements sont presque exclusivement réservés à la mise en valeur agricole de la zone endoréique de la *Comarca Lagunera*.

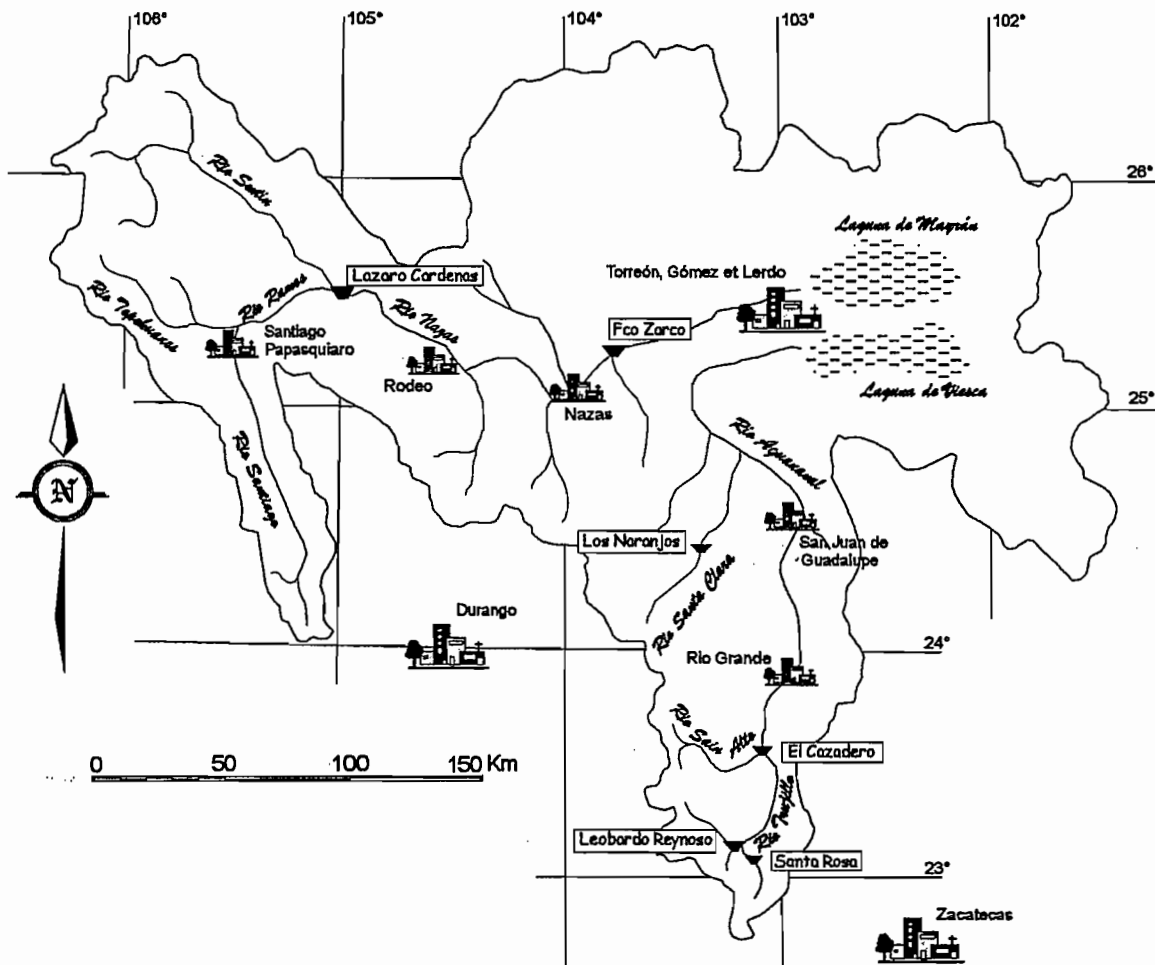


Figure 2.2. Les villes et barrages les plus importants de la RH36.

2.3. Les eaux souterraines

Plusieurs aquifères ont été identifiés dans la RH36. Ils sont utilisés à des fins agro-pastorales et pour les besoins en eau des zones urbaines et industrielles. Un de ces aquifères est celui de La Laguna, le plus important et le plus exploité de la RH36 avec environ 3 000 puits et un volume d'extraction moyenne annuelle de 1 100 millions de m³. Il est placé dans la province géologique sédimentaire de Coahuila, une des provinces les mieux étudiées par la PEMEX¹ et l'Institut de Géologie de l'UNAM² pour la recherche de charbon et de pétrole. Plusieurs études ont permis de définir la séquence chrono-stratigraphique du haut plateau nord-mexicain (SARH 1977; SARH 1981), allant principalement du Jurassique au Quaternaire (annexe 2.1).

Parmi les formations géologiques de cette séquence, deux sont susceptibles de disposer de ressources en eau souterraine :

- ♦ la formation “ *Aurora* ”, du Crétacé inférieur; constituée de roches sédimentaires calcaires et dolomitiques (mélange isomorphe de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie, Moret 1967) d'origine récifale. Elle est présente dans tout le sous-sol de la plaine de la zone lagunaire, affleurant seulement à la périphérie de la plaine dans les sierras *del Rosario* et de *San Lorenzo* (figure 2.3). Elle est perméable grâce à la porosité de ses roches sédimentaires et à leur fracturation. Sa puissance atteint 600 m dans sa plus grande épaisseur.
- ♦ la formation des “ Alluvions du quaternaire ”, composée de matériaux provenant de l'érosion des formations du Crétacé supérieur ayant comblé les vallées. Cette formation est perméable car les alluvions, de composition très variable, ne sont pas cimentées. Son épaisseur maximale est indéterminée mais peut atteindre localement 400 m.

Localement, il est possible que les aquifères puissent constituer un seul système souterrain. En effet, l'aquifère calcaire (formation *Aurora*) peut éventuellement alimenter celui des alluvions (figure 2.3). D'autres formations géologiques (“ *La Peña* ” ou “ *Santa Inés* ”) peuvent emmagasiner de l'eau souterraine, mais elles sont de faible importance et souvent très localisées.

¹ Petroleos MEXicanos (Société pétrolière mexicaine)

² Universidad Nacional Autónoma de México

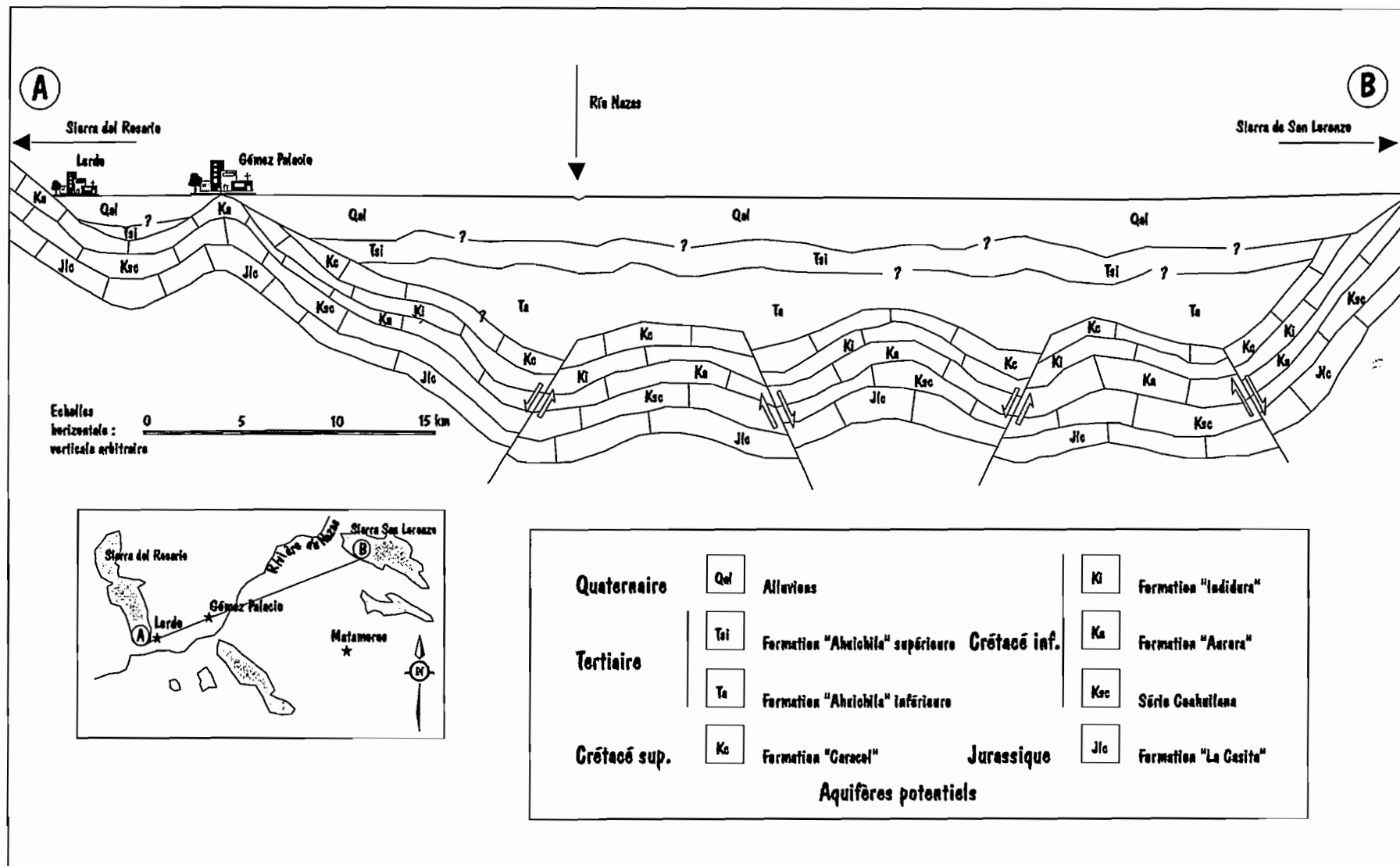


Figure 2.3. Coupe géologique schématique du bassin endoréique de la Comarca Lagunera (Brouste 1996)

2.4. Utilisation des eaux souterraines

L'histoire des haciendas implantées le long du Nazas et de l'Aguanaval est liée à l'agriculture et l'élevage et, jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, cette exploitation agricole est restée uniquement tributaire des ressources en eaux superficielles de ces deux bassins. Au fur et à mesure de l'augmentation des superficies agricoles dans les haciendas, devenues petits villages avec la réforme agraire, les besoins en eau n'ont cessé de croître et les nombreuses dérivations des cours d'eau ont progressivement modifié de manière sensible le régime hydrologique des rios Nazas et Aguanaval; les écoulements, qui parvenaient aux lagunes et servaient en partie à la recharge des nappes souterraines de la partie basse, ont diminué peu à peu jusqu'à leur complète disparition après la mise en service du barrage régulateur de Lazaro Cardenas, affectant ainsi les possibilités d'irrigation de certaines communautés.

Face à ce problème de disponibilité en eaux superficielles, les premiers forages furent implantés à partir de 1920 dans la partie basse de la RH36 pour satisfaire l'irrigation. Leur nombre a augmenté et leur exploitation s'est peu à peu intensifiée jusqu'à une apparente stabilisation en 1960 (figure 2.4), due à une limitation du nombre des puits imposée autoritairement par les lois de 1952 et de 1958 (*leyes de veda*) et aussi à la fermeture des forages lorsque la profondeur de pompage devenait excessive et que les coûts d'extraction diminuaient la rentabilité, ou encore lorsque la qualité de l'eau devenait impropre à l'irrigation par excès de sels (González Barrios 1992).

Le caractère assez rustique des premières irrigations antérieures à 1960, effectuées par des canaux en terre non revêtus et par application de fortes lames d'eau aux cultures, a favorisé la recharge de la nappe phréatique. Ainsi, on a estimé que le volume de recharge de ces nappes était, en régime naturel, de l'ordre de 100 millions de m³ par an, et que, avec la croissance des superficies irriguées, ce volume serait passé à 300 ou 400 millions de m³ (SARH, 1980). De 1962 à 1972, une série de travaux ont été progressivement réalisés pour une meilleure efficacité de l'eau d'irrigation : les terres cultivées ont été nivelées et les canaux cimentés. Actuellement, la recharge estimée de l'aquifère ne serait plus que de 200 à 300 millions de m³/an.

Parmi les 3 000 forages de la Laguna, 80 % sont utilisés par l'agriculture (González Hita *et al.* 1995). Le volume d'eau souterraine extrait annuellement a connu un maximum historique de 1 500 millions de m³ en 1958 (SARH 1980). En conséquence, le niveau de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera s'abaisse en moyenne de 1,5 mètre par an depuis 25 ans (Brouste 1996, figure 2.5).

En dehors de la plaine, c'est à dire sur les versants de la RH36, l'exploitation de l'eau souterraine à de fins agricoles est peu pratiquée. Dans la partie haute des bassins, c'est l'agriculture pluviale, avec en complément la dérivation des écoulements des cours d'eau qui est la plus commune. L'utilisation de l'eau souterraine se limite à la consommation domestique dans les villages et à l'abreuvement du bétail pendant la saison sèche.

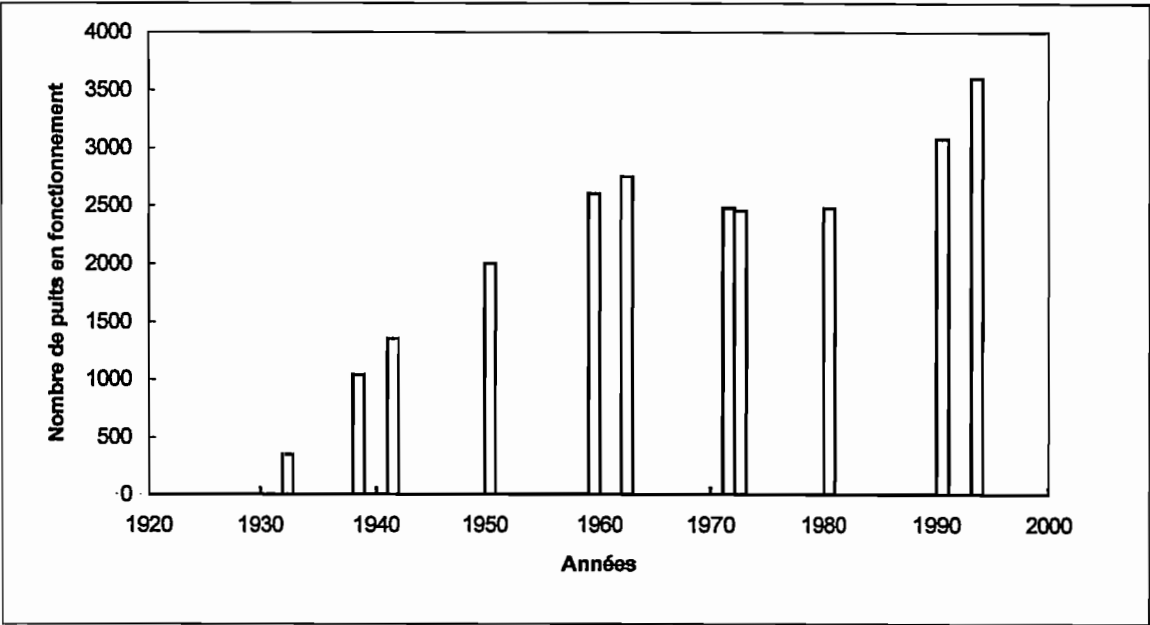


Figure 2.4. Evolution du nombre des puits dans la partie basse de la RH36.

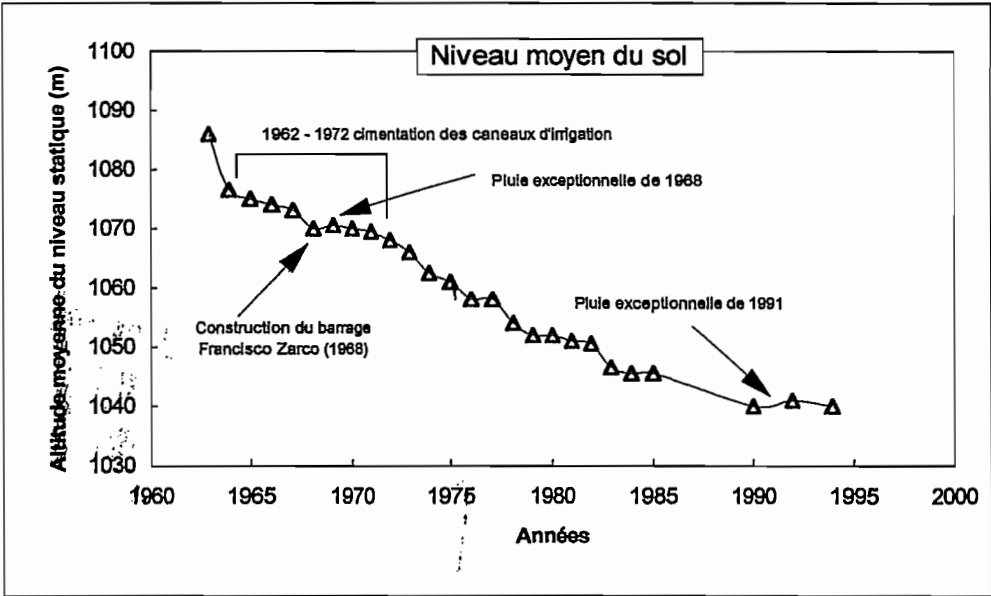


Figure 2.5. Evolution du niveau statique de la nappe phréatique en fonction du temps dans la Comarca Lagunera.

2.5. Bilan hydrologique régional.

Le bilan hydrique de la RH36 (figure 2.6), montre que 5,7 % des pluies tombées en année moyenne (23 milliards de m³), s'écoulent jusqu'aux lagunes (1,3 milliards de m³). Pour la production agricole sur de grands périmètres irrigués, ces écoulements sont gérés à partir d'un stockage dans un dizaine de retenues parmi lesquelles les plus importantes sont les retenues de Lazaro Cardenas et Fransisco Zarco.

L'évapotranspiration reprend 97,3 % de la pluie annuelle qui tombe sur la RH36 (23 milliards de m³). La recharge des aquifères en mobilise 1% (0,23 milliard m³) et 1,7 % se perd par évaporation dans les retenues, les rios, les lagunes et les canaux. Dans la partie basse de la région, la consommation d'eau présente un bilan déficitaire : sur un total de 2 320 millions de m³ consommés annuellement, 2 200 le sont par l'agriculture et 120 pour les usages urbains; 1 200 millions de m³ proviennent des écoulements, 1 120 sont extraits des nappes d'eaux souterraines.

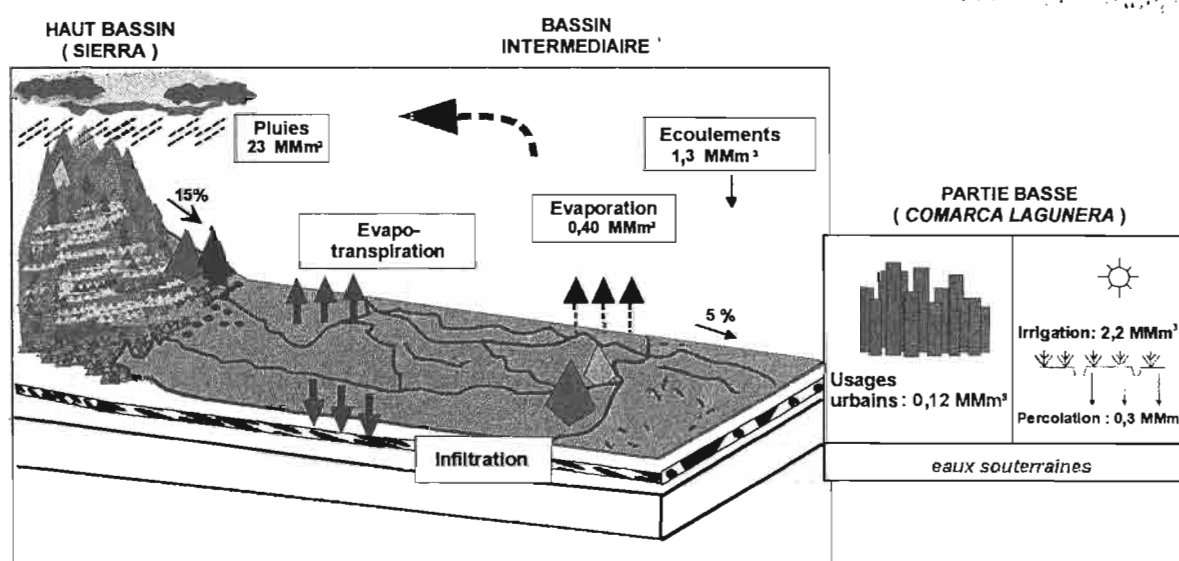


Figure 2.6. Bilan hydrique de la RH36.

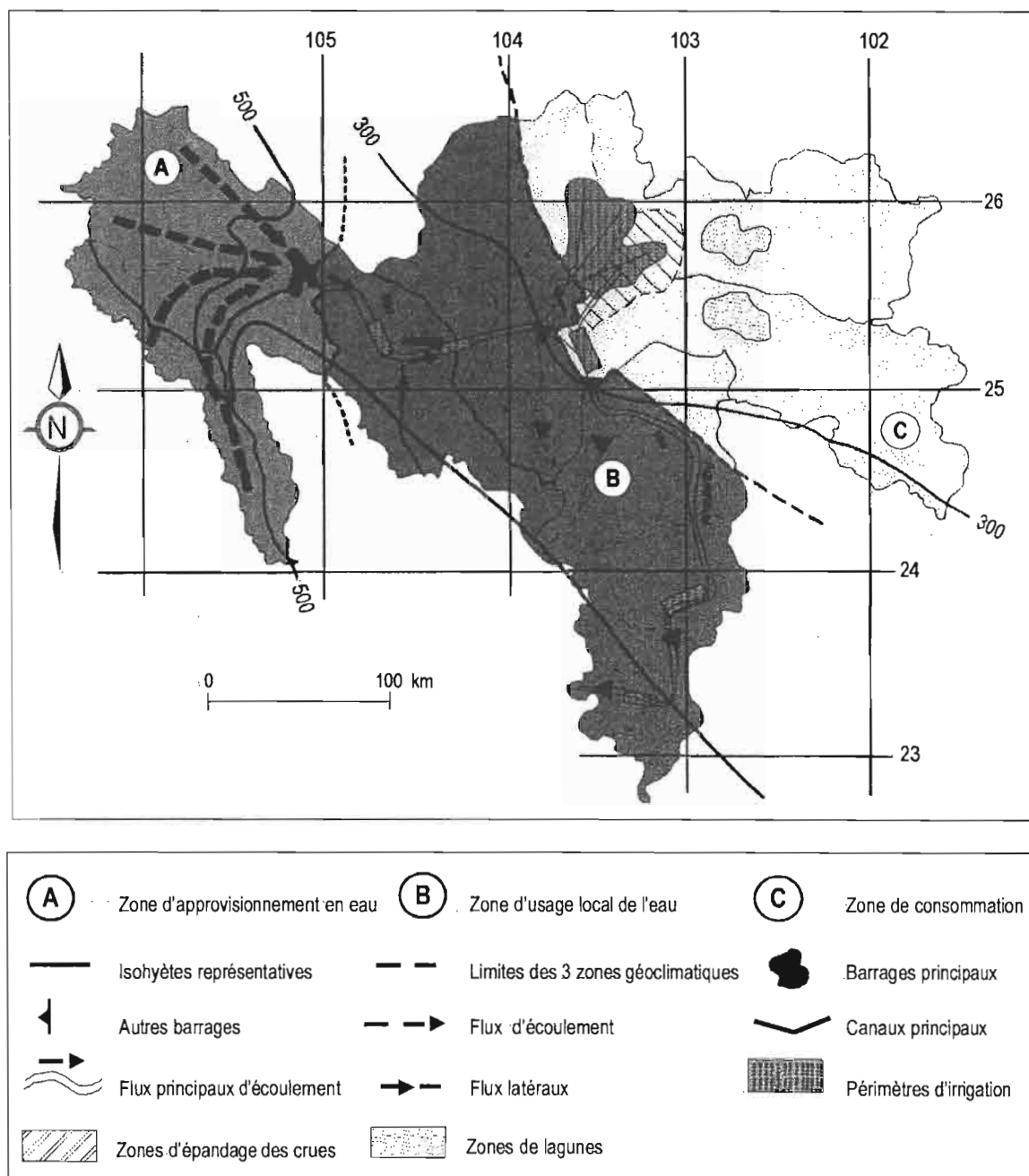


Figure 2.7. Les trois zones hydro-climatiques homogènes de la RH36.

2.6. Conclusion

Par l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques, la RH36 peut être découpée en trois zones hydro-climatiques homogènes représentatives des situations hydrologiques endoréiques rencontrées dans les paysages semi-arides du Nord-Mexique (figure 2.7, Descroix *et al.* 1993) :

- ♦ **La partie haute de la RH36, sub-humide**, est formée des sous-bassins Salome Acosta, Sardinas et Palmito pour le río Nazas, des sous-bassins El Sauz et El Cazadero pour le río Aguanaval. Elle fournit 89 % du total des écoulements de la région grâce à des précipitations assez fortes. Ces sous-bassins ont les coefficients d'écoulement les plus élevés de la RH36 (de l'ordre de 15 %).
- ♦ **La partie intermédiaire semi-aride** couvre les pluviométries annuelles comprises entre 300 et 500 mm sur le piémont oriental de la Sierra Madre et le plateau du bassin de l'Aguanaval. Dans cette zone, les écoulements sont utilisés localement par les paysans pour l'agriculture ou l'élevage. L'eau, stockée dans de petits barrages appelés "*presones*", est utilisée pour l'abreuvement du bétail ou la petite irrigation de complément.
- ♦ **La partie basse, aride**, est la zone des lagunes. Elle reçoit les écoulements provenant de la partie haute, utilisés pour l'agriculture irriguée intensive.

La région de Cuencame, où se situe le ranch Atotonilco, se localise dans la partie intermédiaire semi-aride de la RH36, dans le haut bassin du Cañon Fernandez où la pluviométrie annuelle est de 350 à 400 mm. Elle est orientée vers des activités agro-pastorales qui sont rendues possibles par une gestion locale des eaux superficielles et souterraines.

CHAPITRE 3

L'ADMINISTRATION DE L'EAU DANS LA PARTIE MÉDIANE SEMI-ARIDE DE LA RH36

3.1. Historique

3.1.1 Propriété et exploitation des terres

On ne peut parler de production agro-pastorale dans la partie médiane de la RH36, ni bien sûr de gestion de l'eau, sans les replacer dans le contexte historique national.

Au Mexique, la propriété de la terre fut la principale cause de la Révolution de 1910. Cette année-là, selon les données de la Présidence de la République, étaient recensées 622 000 propriétés privées, dont 65 % comptaient moins de 5 hectares, alors qu'il y avait près de 10 000 haciendas de plus de 1 000 hectares, accaparant près de 50 % du territoire national, les 110 plus grandes couvrant en moyenne 272 000 hectares (Ledesma, 1992).

Avec la Révolution mexicaine, ces grandes propriétés ou *latifundia* disparurent; seules furent autorisées les petites propriétés et les propriétés communautaires (*ejidos*). L'*ejido* fut défini comme un ensemble de terres, d'eaux et de forêts attribuées par l'Etat à un noyau de population avec interdiction de les vendre, de les louer ou de les transférer. La création des *ejidos* se fit en tenant compte des antécédents des sociétés préhispaniques et de la réappropriation des terres issues de la colonisation espagnole. Cette réforme agraire avait pour principal objectif de satisfaire les exigences des paysans durant la Révolution (Nuñez 1992, Gómez 1992).

C'est à partir de 1917 que ces nouvelles structures de petites propriétés et d'*ejidos* ont commencé à morceler les grandes propriétés. Cependant, il faut encore attendre 1936 pour qu'un fort élan soit donné à la répartition de la terre entre les nouveaux propriétaires et les *ejidatarios* : en seulement six années (1936 à 1942), vingt millions d'hectares furent ainsi répartis.

Cette nouvelle répartition des terres a entraîné de nouveaux besoins. Ainsi, une réglementation de la distribution de l'eau et une mobilisation des ressources financières se sont avérées indispensables. C'est dans cette optique que le gouvernement, surtout à partir de 1936, entreprend une série de travaux et de programmes en vue de satisfaire ces besoins. Pour faciliter l'installation de la nouvelle société rurale, l'Etat recherche alors une meilleure mise en valeur des ressources hydrauliques par la construction de barrages et le financement de puits dans les *ejidos*. Tout cela a favorisé un développement soutenu de la production agricole mexicaine entre 1940 et

1970. C'est ainsi que cette production vivrière (maïs, haricot, blé) a pu satisfaire le marché intérieur et permettre l'exportation d'excédents (20 à 30% de la production, Ledesma 1992).

3.1.2. Population de la RH36

Dans la Région Hydrologique 36, la croissance des différentes communautés est très liée à la disponibilité en eau. Avant l'arrivée des espagnols (années 1500), les communautés indiennes vivaient autour des lagunes des produits de la chasse, de la pêche et d'une agriculture très rudimentaire pratiquée sur les terres de décrue. Lors de la conquête, les espagnols fondèrent, avec les indigènes, plusieurs petits villages sur des sites favorables à une exploitation minière, agricole ou pastorale. Les conditions climatiques et la disponibilité en eau ont été des facteurs déterminants dans le développement de ces communautés. Jusque dans les années 1700, les villages les plus importants se sont créés autour d'exploitations minières.

Actuellement, la RH36 a une population voisine de 1 750 000 habitants, avec une densité moyenne de 23 habitants/km². Seulement 33,6 % de cette population vit en milieu rural. La majorité vit donc en milieu urbain, principalement dans les agglomérations de la partie basse et aride de la région à Torreón, Gómez Palacio ou Ciudad Lerdo (Orona 1993). Une analyse, effectuée à partir des recensements de population, montre que les villages ruraux les plus développés sont ceux situés dans le bassin de l'Aguanaval. En effet, de 1970 à 1990 la population du bassin de l'Aguanaval a cru en moyenne de 70 %, tandis que celle du Nazas n'a progressé que de 7,4 %. Des conditions topographiques et pédologiques plus favorables dans le premier bassin : relief de plateau et larges vallées (Loyer 1996), expliquent le développement de l'agriculture et par voie de conséquence celui de la population, développements favorisés par une mobilisation des ressources en eau.

Ainsi, dans le bassin de l'Aguanaval, la construction des barrages a commencé dès 1905 et il est équipé actuellement de quatre barrages de moyenne importance (capacité totale de 146 millions de m³) et de plusieurs autres petits ouvrages (1 à 2 millions de m³). Deux grands barrages seulement ont été construits dans celui du Nazas : Lazaro Cardenas et Francisco Zarco ayant respectivement pour capacité de stockage 4 400 et 400 millions de m³ (Cf. chapitre 2.2). De plus, les périmètres irrigués à partir des eaux de río Nazas sont exclusivement implantés dans la partie basse du bassin versant, en zone semi-aride, là où la topographie le permet.

3.2. Les différents systèmes d'exploitation et les usages de l'eau

3.2.1 Les systèmes d'exploitation agro-pastoraux

Pour se développer, les communautés rurales du Nord-Mexique ont établi cinq systèmes d'exploitation agricole et d'élevage. Ces systèmes font appel soit aux ressources exogènes, soit aux ressources en eau locales.

- ♦ En utilisant les canaux de dérivation des écoulements du río Nazas, l'agriculture intensive irriguée a débuté dès le début du 19^{ème} siècle dans la partie basse et semi-aride avec la culture

du coton. Après la réforme agraire de 1936, les cultures irriguées se sont diversifiées avec l'introduction de la luzerne, de la vigne, du maïs et du sorgho en faisant de plus en plus appel à la ressource en eaux souterraines. Ainsi, se sont progressivement développées des industries laitière et viticole dans la Comarca Lagunera et sur le pourtour des zones lagunaires.

- ♦ L'agriculture pluviale stricto sensu est un système de production qui s'est mis en place dans toute la partie intermédiaire de la RH36, dans la bande des précipitations comprises entre 300 et 500 mm (Orona, 1993). Ce système se consacre principalement aux cultures du maïs et du haricot destinées à l'autoconsommation. Les sols sont préparés en avril et mai, avant les premières pluies de juin qui coïncident avec les premiers semis.
- ♦ L'agriculture pluviale avec irrigation de complément (*medio riego*) est une stratégie très utilisée dans toute la partie intermédiaire de la RH36 pour améliorer l'alimentation en eau des principales cultures vivrières (maïs et haricot). Elle consiste dans la dérivation des eaux provenant des cours d'eau temporaires ou dans la captation des ruissellements générés sur les versants proches des aires cultivées, par la construction rustique de petits ouvrages ou de canaux qui conduisent les écoulements jusqu'aux terres de culture.
- ♦ L'élevage laitier intensif est implanté principalement dans la Comarca Lagunera. Cette production laitière est un système qui consomme de grandes quantités d'eau, sachant que pour produire 1 litre de lait il faut apporter un peu plus de 1 000 litres d'eau d'irrigation. Car la plupart des 245 000 bovins réservés à cette production ont une alimentation basée sur la luzerne, fourrage gros consommateur d'eau. La luzerne (*alfalfa*) a besoin en effet d'une hauteur d'eau moyenne d'irrigation de 2,5 m par an.
- ♦ L'élevage extensif caractérise la majorité des systèmes de production de viande. Dans ce système, le bétail est alimenté par des pâturages naturels couvrant d'immenses superficies. Ce type d'exploitation, qui concerne près de 120 000 têtes de bétail, dans la partie moyenne et la partie basse de la RH36, réduit la consommation en eau aux seuls besoins journaliers de l'abreuvement du bétail (30 à 50 litres par tête et par jour). Les stratégies d'approvisionnement en eau de ce bétail sont diverses. Les plus communément rencontrées sont des ouvrages de rétention d'eau appelés *jagüeyes*, *aguajes* ou *presones* selon la région. Ces petits barrages sont construits dans le lit des cours d'eau temporaires (*arroyos*) ou dans les dépressions. Ils retiennent ainsi une partie des écoulements et des ruissellements superficiels et sont utilisés, dans le meilleur des cas, 8 à 10 mois de l'année comme abreuvoirs. Une autre stratégie, très utilisée dans le ranch Atotonilco, consiste à équiper les pâturages en abreuvoirs alimentés par les eaux souterraines captées par des forages équipés de pompes à moteur ou d'éoliennes.

3.2.2. Les nouvelles stratégies d'exploitation

Soixante-quinze ans après le début de la Réforme Agraire, une série de crises économiques récurrentes (1976, 1982 et 1987), réduisit fortement la capacité d'autofinancement de la paysannerie mexicaine qui éprouva une difficulté croissante à assurer l'autosuffisance alimentaire d'une population en constante augmentation (à un rythme de 2 % par an). C'est dans ce contexte que le gouvernement, se basant sur une politique économique d'ouverture internationale et suivant une

stratégie de fourniture de capitaux au monde rural, a décidé de modifier une nouvelle fois le système foncier.

Au cours de l'année 1991, le gouvernement fédéral prit l'initiative de réformer l'article 27 de la constitution mexicaine dans laquelle figuraient, entre autres, deux mesures importantes : la distribution des terres des *latifundia* aux *ejidatarios* et le fait que les terres ejidales pouvaient désormais être louées ou vendues. Cette réforme, visant l'ouverture de l'agriculture nationale aux capitaux internationaux, bien que sévèrement critiquée, fut favorablement accueillie par les différents secteurs de production; elle fut finalement approuvée par le parlement fin 1993. Le nouvel article 27 de la constitution met fin à la distribution agraire initiée en 1917. Au niveau national, la terre reste distribuée de la façon suivante : 43,3 % aux *ejidatarios*; 37,2 % aux petits propriétaires; 8,1 % aux communes; 11,4 % au Domaine public non communal (terrains vagues, zones urbaines et propriétés fédérales). Du fait du droit d'accès à la propriété des terres donné aux *ejidatarios* (Ledesma Mares, 1992), un nouveau plan cadastral appelé PROCEDE¹ dut être mis en œuvre par l'INEGI. Il a pour objet de réaliser les actes légaux et d'établir les nouvelles limites de propriété des anciennes terres ejidales sur les plans cadastraux. Ce programme est mis en place dans chacun des Etats de la République et l'état de Durango fut parmi les premiers à en assurer la mise en œuvre.

En donnant aux *ejidatarios* le choix du type de propriété et de leur système de production, le but de cette réforme est d'accélérer le flux des capitaux vers les milieux ruraux et d'accroître la productivité du secteur agro-pastoral. De la sorte, on s'attend à une augmentation de la taille des exploitations ce qui devrait permettre un accroissement de la productivité et un usage plus efficace des moyens de production.

3.3. Exploitation agricole et usage local de l'eau dans la partie semi-aride de la RH36

3.3.1. Les systèmes d'exploitation propres à la zone semi-aride

A côté des cultures pluviales qui peuvent se développer avec quelques chances de réussite dans les zones les plus humides de la partie intermédiaire de la RH36 (300 à 500 mm de précipitation par an), d'autres stratégies d'exploitation de la terre, faisant appel aux ressources en eau locales, se sont établies.

- ◆ L'agriculture pluviale avec irrigation de complément s'est développée principalement dans la zone semi-aride au sein des communautés *ejidales* avec la production de maïs et de haricot. L'installation des systèmes de dérivation est possible dans la partie médiane du bassin de l'Aguañaval, alors qu'elle l'est moins sur le bassin du río Nazas (pentes de 9,5 degrés pour la partie médiane du bassin versant de l'Aguañaval contre 17 degrés pour celui du Nazas). D'autre part, à la faiblesse des pentes correspondent des caractéristiques pédologiques plus favorables à la mise en culture (profondeur plus grande et pierrosité plus faible, Viramontes *et al.* 1999).

¹ Programa de recatastración ejidal.

- ♦ La petite irrigation s'est localement implantée dans les zones médianes des bassins versants des río Nazas et Aguanaval. De petits barrages ont été implantés soit directement sur les rivières collectant les eaux de ruissellement de bassins versants d'assez grande taille (barrage Mercedes), soit sur des cours d'eau plus petits en complétant les apports aux réservoirs par dérivation des eaux des bassins versants voisins en période de crue (*tanques* Miguel Auza, Gentil et Simón Bolívar).
- ♦ L'élevage extensif ou semi-extensif est pratiqué sur des pâturages naturels aux qualités variables selon la nature des matériaux géologiques et pédologiques et selon le niveau de dégradation plus ou moins marqué de la végétation. Selon les recensements agricoles, ces activités sont les plus rentables de la zone semi-aride (Orona, 1993). Elles sont surtout pratiquées par de petits propriétaires. Une gestion stricte des ressources hydriques et biotiques, à l'exemple du ranch Atotonilco, procure à ce type d'exploitation une bonne rentabilité économique.

3.3.2. L'élevage bovin extensif

Parmi les activités liées à l'élevage, celles qui sont réservées à la production de viande font l'objet de conditions d'exploitation particulières. En effet, dans la majorité des petites propriétés qui s'y consacrent, le bétail est destiné à l'exportation vers les Etats-Unis car elle procure aux éleveurs les gains les plus importants. Depuis l'ouverture commerciale du pays, l'expérience acquise dans ce domaine laisse espérer un accroissement de cette activité.

En zone semi-aride, la disponibilité en eau représente une des pièces maîtresses de ce système d'élevage. Le régime pluvial influence directement le développement des pâturages naturels. Il a donc un impact important sur la production bovine. Pour pallier le manque de fourrage durant les périodes sèches, les éleveurs appliquent plusieurs stratégies : le bétail peut être alimenté à partir des raquettes de figuiers de barbarie naturellement présents ou introduits à cette fin dans les aires de parcours, par des fourrages ensilés comme le maïs et le sorgho et, dans les cas d'extrême sécheresse, par l'achat de fourrages en provenance de la zone basse irriguée très éloignée des exploitations.

Quant aux stratégies d'abreuvement, elles sont également diverses et importantes car la disponibilité en eau influence directement la qualité de la viande. Pour limiter la longueur des parcours journaliers et réduire ainsi la dépense d'énergie et la rigidité musculaire des animaux, la dimension des pâturages et la densité des points d'eau doivent être pris en compte. En général, les éleveurs retiennent les écoulements superficiels à l'aide de digues en terre construites sur des sites sélectionnés par eux-mêmes en s'appuyant d'une part sur une connaissance empirique des ruissellements et d'autre part sur une configuration naturelle favorable à la construction des ouvrages. Pour satisfaire les besoins en eau du bétail, une autre possibilité est l'extraction des eaux souterraines par le forage de puits sur des sites permettant une redistribution de l'eau par gravité jusqu'aux abreuvoirs dispersés dans les enclos.

3.3.3. Perspectives de développement de l'élevage extensif

L'élevage extensif est aujourd'hui confronté à l'ouverture économique vers les marchés internationaux. Face à la concurrence, cette ouverture constitue un important défi. Dans la zone semi-aride de la RH36, des possibilités de croissance sont offertes à ce type d'activité car les communautés rurales orientent plutôt leurs activités vers l'agriculture semi-irriguée alors que le milieu naturel se prête davantage à l'élevage extensif. Les changements attendus de la réforme foncière devraient permettre aux associations de producteurs de se consacrer à cette activité sur de plus grandes superficies. La possibilité d'emploi d'une main d'oeuvre locale qualifiée existe, bien que celle-ci ait des offres salariales plus intéressantes en émigrant vers les gros centres urbains, ou en passant illégalement aux Etats-Unis. Une majorité préfère néanmoins demeurer dans la région.

Le principal défi que devra affronter ce secteur d'activité sera de trouver un équilibre entre un usage des ressources permettant d'atteindre un bon niveau compétitif et une gestion rationnelle des pâturages et de l'eau qui garantisse la durabilité du système. La ressource en eau forme une composante importante du ce système d'exploitation et sa gestion optimale devra être recherchée.

3.4. Conclusion

La production agro-pastorale de la RH36 est intimement liée à l'histoire du Mexique. Actuellement, au vu des changements récents dans la possession de la terre, on s'attend à une réorganisation sociale et économique des secteurs agricoles et pastoraux. Il est souhaitable que la nouvelle exploitation des ressources se fasse de manière plus efficace et en même temps durable. Cependant, les fortes contraintes issues de l'ouverture économique au marché international vont nécessairement conditionner le développement de ces deux types d'activité.

Dans la partie moyenne de la RH36, avant tout terre d'élevage, le nouvel ordonnancement de la propriété des terres est considéré comme une forte incitation à augmenter les superficies consacrées à l'élevage extensif. Dans ce nouveau contexte, les ressources hydriques locales jouent un rôle déterminant dans la gestion des pâturages et l'abreuvement du bétail. La connaissance du potentiel hydrique, superficiel et souterrain, est donc une priorité pour assurer cette mise en valeur. Pour gérer de manière optimale la ressource en eau deux solutions peuvent être envisagées :

- l'utilisation des eaux de ruissellement collectées grâce à des digues de rétention correctement situées;
- l'extraction des eaux souterraines par des forages équipés de pompes à moteur ou d'éoliennes.

Or il n'existe pas encore d'étude hydrologique régionale permettant de bien connaître les ressources en eaux superficielles et les risques liés aux crues. Les connaissances acquises sur le ranch Atotonilco par l'étude hydrologique de sept *presones*, répartis sur les principales formations lithologiques régionales, devraient ainsi permettre de jeter les bases d'une meilleure politique régionale d'aménagement hydraulique.

CHAPITRE 4

LE RANCH ATOTONILCO

Les travaux de terrain associés à cette thèse ont été réalisés au sein d'une propriété privée consacrée à l'élevage, située dans la partie intermédiaire semi-aride de la RH36. Cette propriété, appelée "*Compañía Ganadera Atotonilco*" ou "*Rancho Atotonilco*", développe une activité pastorale et une gestion des eaux représentatives des grandes propriétés de la région semi-aride. Cette mise en valeur pastorale consiste en une gestion des pâturages basée sur un système d'enclos et une répartition du bétail dans ces enclos, en fonction de la qualité et de la productivité des pâtures. L'alimentation en eau du bétail est assurée conjointement par les eaux de lacs collinaires (*presones*) et par l'exhaure d'eaux souterraines extraites à l'aide de pompes à moteur ou d'éoliennes (*papalotes*).

4.1. Situation du ranch Atotonilco dans la RH36

Le ranch Atotonilco, avec une superficie de 45 000 hectares, est considéré comme l'un des plus grands du territoire nord-mexicain (Anaya et Barral 1995). Il est localisé dans la partie haute du bassin versant du río Cuencame, affluent du río Nazas sur sa rive droite. Le río Cuencame est l'un des tributaires du barrage Francisco Zarco et appartient au sous-bassin Cañon Fernandez. Situé entre les méridiens 24°33' et 24°50' de latitude nord et les parallèles 103°34' et 103°50' de longitude ouest (figure 4.1), le ranch est rattaché administrativement à la commune (*municipio*) de Cuencame (*Estado de Durango*) où l'agriculture pluviale et l'élevage sont les principaux pôles d'activité de la population.

Le ranch fait partie de l'ancienne *hacienda* de "*Atotonilco de Campa*" qui couvrait une superficie de 89 000 hectares avant la Révolution de 1910. Cette Hacienda fut divisée en deux parties par expropriation : 45 000 hectares pour sa partie amont, le ranch Atotonilco, et 44 000 hectares pour sa partie aval, l'*ejido* Severino Cenicerós qui rassemble aujourd'hui environ 626 exploitants (*ejidatarios*).

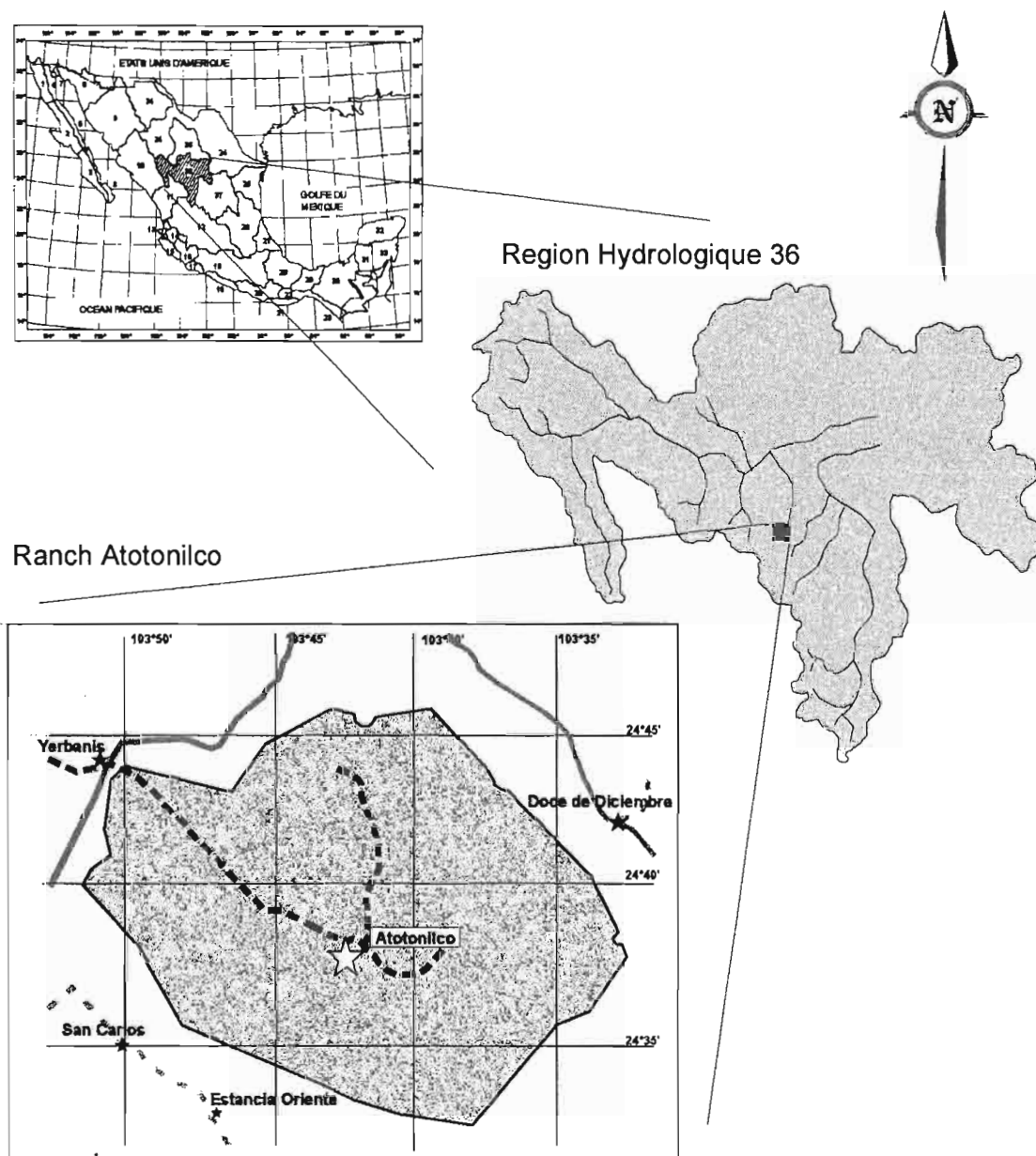


Figura 4.1. Localisation du ranch Atotonilco.

4.2. Le milieu naturel

4.2.1. Climat

Températures

La comparaison des températures moyennes mensuelles entre la station Atotonilco, située dans la partie centrale du ranch à 2 100 mètres d'altitude, et celle de Cuencame, située plus en aval à 1 700 mètres d'altitude, montre qu'il existe une différence de deux à quatre degrés selon l'époque de l'année (figure 4.2). Le gradient altitudinal des températures moyennes mensuelles varie de $-0,5$ à -1 degré Celsius pour 100 mètres de dénivelé.

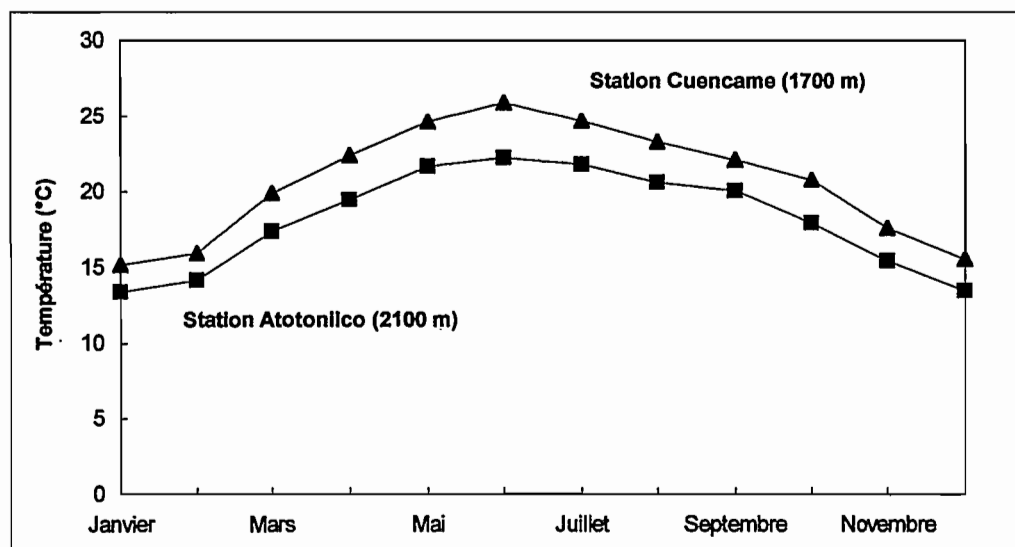


Figure 4.2. Températures moyennes mensuelles des stations Atotonilco et Cuencame.

Les températures minimales sont enregistrées en hiver, de décembre à février ; durant cette saison on observe plus de 40 fronts froids (*Climatología de México*) qui peuvent occasionner, si les conditions d'humidité le permettent, des chutes de neiges légères comme celles des années 1991 et 1997.

Les températures les plus élevées sont enregistrées en mai et juin, juste avant la saison des pluies, avec des maximums supérieurs à 35°C. Les températures maximales journalières durant cette période peuvent dépasser les 40°C. Les amplitudes journalières sont souvent supérieures à 20°C. Elles s'accroissent en saison sèche, de janvier à mai, période pendant laquelle elles dépassent souvent 30°C. Elles diminuent en saison des pluies pour atteindre des valeurs inférieures à 15°C (figure 4.3 A et B).

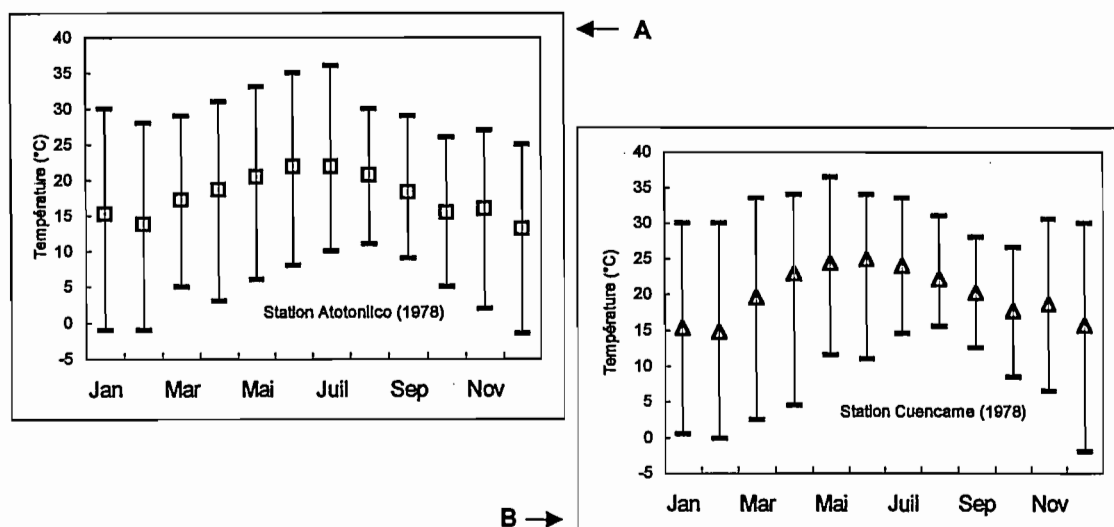


Figure 4.3. Températures maximales et minimales absolues, pour les stations de Atotonilco (A) et Cuencame (B) pour l'année 1978.

Evaporation

A partir des données d'évaporation enregistrées sur un bac classe A à la station Atotonilco (1969-1983 et 1996-1997), on observe que durant les mois les plus chauds et les plus secs, de mars à juin, l'évaporation moyenne journalière est supérieure à 6 mm, avec un maximum de 7,8 mm/jour durant le mois de mai (tableau 4.1). Elle diminue sensiblement en saison des pluies, avec une moyenne de 4,5 mm/jour, et se maintient stable par la suite durant les mois d'hiver avec une moyenne de 3,8 mm/jour. L'évaporation maximale journalière moyenne atteint la valeur de 10,3 mm durant le mois de juin, alors que le minimum est de 1,8 mm pour le mois de décembre.

Tableau 4.1. Evaporation moyenne journalière en mm, maxima et minima mensuels pour la station de Atotonilco sur la période 1969-1983 et 1996-1997.

	Janv.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Moyenne	3,7	4,4	6,6	7,2	7,8	7,3	5,5	4,6	4,0	4,0	3,9	3,3
Maxima	5,7	5,6	9,2	9,5	9,7	10,3	8,3	5,4	6,0	5,0	4,9	4,7
Minima	1,8	3,2	3,9	5,3	5,4	5,2	3,9	3,3	2,0	2,3	2,5	2,0

Le total moyen annuel évaporé est donc égal à 1920 mm.

Pluviométrie

Les principales caractéristiques des précipitations sont analysées ci-après à partir des totaux annuels de la station Atotonilco pour les années 1927 à 1997 ainsi que les pluies journalières pour cette même station durant la période 1969/1983. Une analyse plus détaillée de la pluie pour les années 1994 à 1997 est réalisée dans le chapitre 6.

Une façon communément utilisée pour établir la variabilité d'un paramètre déterminé est de mesurer son coefficient de variation, C_v , qui n'est autre que le rapport entre l'écart-type et la moyenne ($C_v = \sigma / m$). Pour la série des 70 années des pluies annuelles, dont les principales caractéristiques statistiques sont présentées dans le tableau 4.2, le coefficient de variation est égal à 0,29. Il est proche des valeurs obtenues en Afrique sahélienne (0,25 à 0,35), (Peugeot 1995), dans la Sierra de Almerias en Espagne (0,28 à 0,30), (Martín 1997), pour des gammes de précipitations annuelles similaires : 400 à 500 mm. Il est cependant inférieur à ceux mesurés dans le Nordeste du Brésil et sur la côte équatorienne : respectivement 0,35 à 0,45 et 0,40 à 0,60, (Nouvelot et Descroix 1996).

A partir de l'analyse des écarts annuels par rapport à la moyenne sur la série de 70 années étudiées (figura 4.4A), on peut définir pour le ranch :

- une période humide de 1937 à 1947,
- une très longue période de sécheresse comprise entre 1953 et 1982 avec une année exceptionnellement humide en 1958 et quatre années humides de 1965 à 1969,
- une période humide à partir de 1984, interrompue par deux années sèches en 1994 et 1995.

Ces observations recoupent celles de Descroix et al. (1993) sur le reste de la RH36.

Tableau 4.2. Principales caractéristiques statistiques des pluies à la station Atotonilco (1927-1997).

Paramètre	Pluie	
	Total annuel	Maximum journalier annuel
Nombre d'observations	71	14
Valeur minimum (mm)	119,0	25
Valeur maximum (mm)	782,0	75,0
Moyenne arithmétique (mm)	426,8	44,7
Médiane (mm)	427,0	42,0
Ecart-type (mm)	124,6	14,7
Coefficient de variation	0,29	0,33

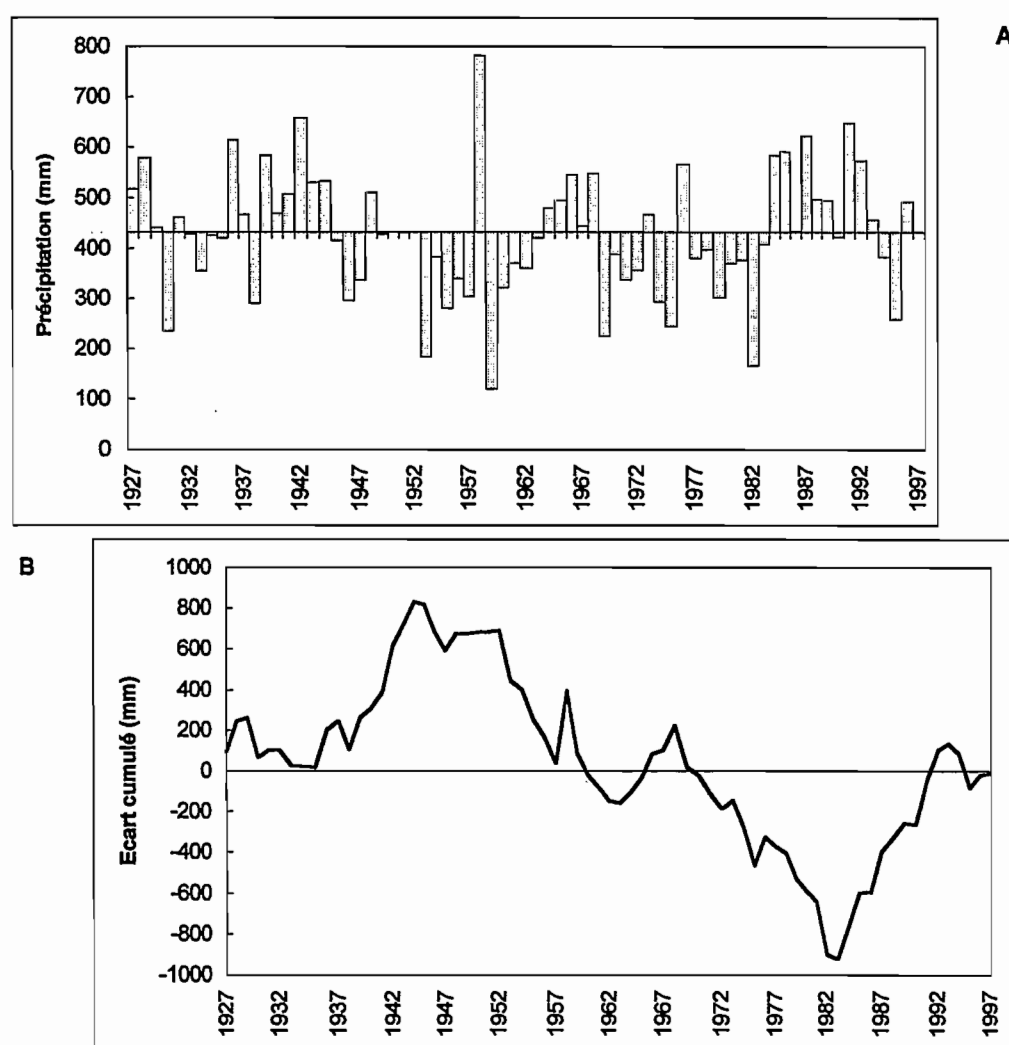


Figure 4.4. Ecarts (A) et écarts cumulés (B) des précipitations annuelles par rapport à la moyenne.

Estrada *et al.* (1993) ont réalisé une série d'ajustements de différentes fonctions de distribution des totaux pluviométriques annuels et des pluies maximales journalières annuelles sur les stations pluviométriques les plus représentatives de la RH36. Ils ont ainsi trouvé que la loi Normale n'est pas toujours la plus adéquate et ne fournit pas le meilleur ajustement aux échantillons des valeurs annuelles, principalement dans la partie basse de la RH36. Par contre, la loi de Gumbel à deux paramètres s'ajuste en général assez bien aux distributions des pluies maximales journalières sur la plupart des stations bien que cette fonction de distribution représente souvent assez mal les valeurs extrêmes (Roche 1963).

Une analyse de la distribution statistique des pluies annuelles, en utilisant le logiciel Safarhy (ORSTOM 1995), a montré que la loi Normale s'ajuste bien à la série de la station Atotonilco. Pour les pluies maximales journalières annuelles, c'est la loi de Gumbel qui s'ajuste le mieux à l'échantillon observé.

Pour les pluies annuelles, les paramètres de la loi de Gauss sont :

$m = 427 \text{ mm}$ et $\sigma = 125 \text{ mm}$, m étant la moyenne et σ l'écart-type.

Pour les pluies journalières maximales annuelles, les paramètres de la loi de Gumbel sont :

$X_0 = 38 \text{ mm}$ et $a = 11,4$, X_0 étant le mode et a le coefficient de croissance exponentielle.

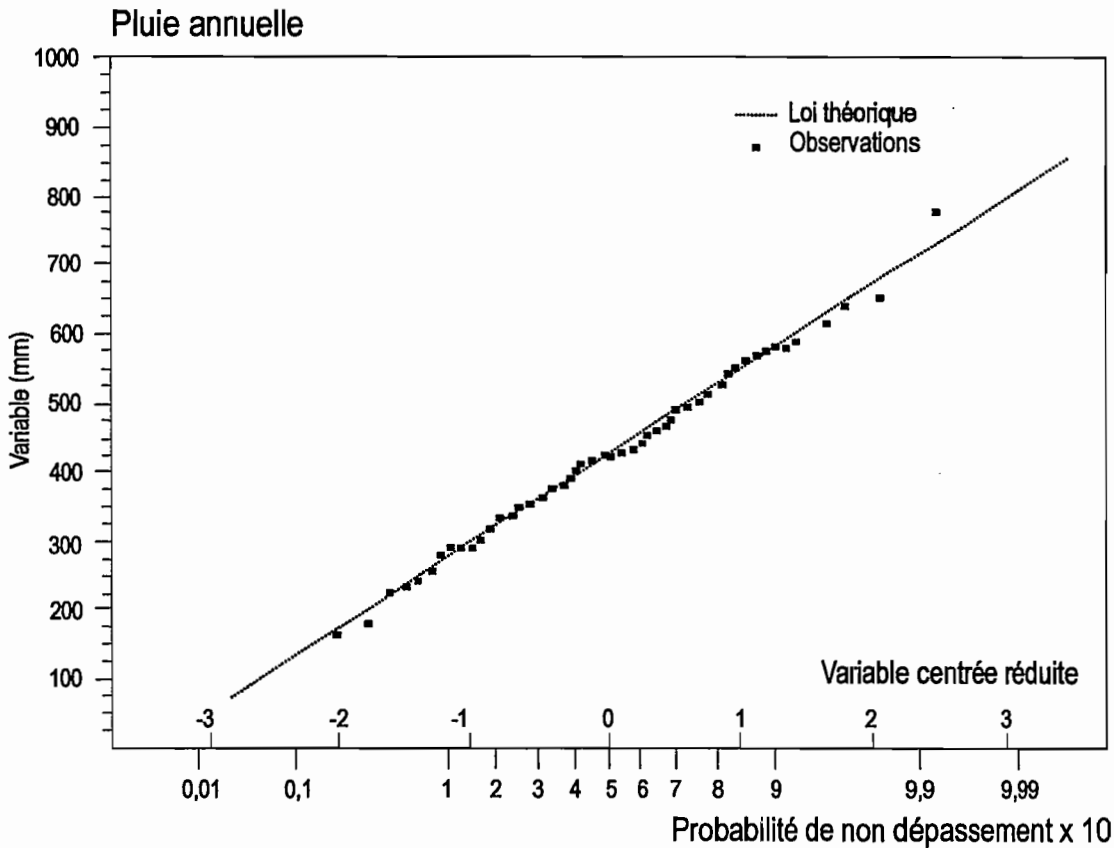


Figure 4.5. Ajustement des pluies annuelles à la station Atotonilco.

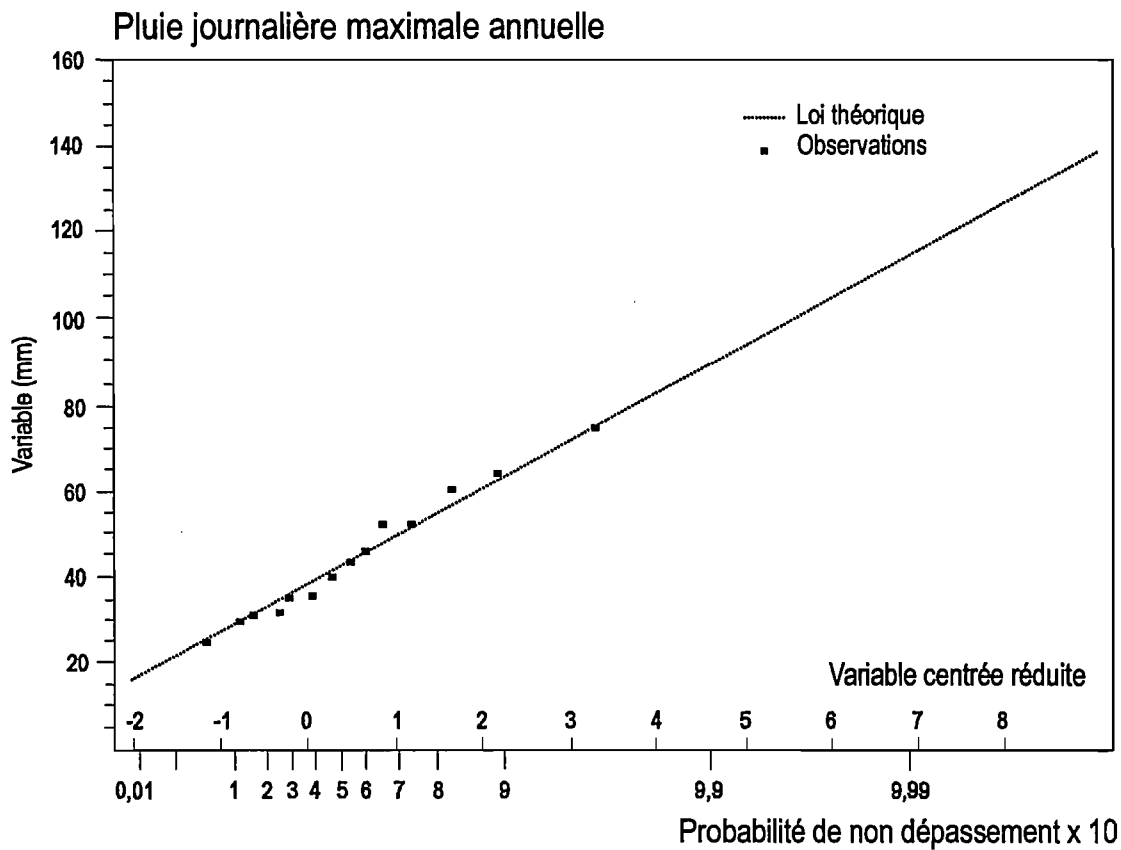


Figure 4.6. Ajustement des pluies journalières.

Tableau 4.3. Pluies annuelles et pluies maximales journalières annuelles à la station Atotonilco pour différentes périodes de retour.

	Années sèches				Mediane	Années humides			
Période de retour (ans)	50	20	10	5	2	5	10	20	50
Pluie annuelle (mm)	171	222	267	322	427	532	587	632	683
Pluie journalière maximale annuelle (mm)	23	26	29	33	42	55	63	71	82

La distribution mensuelle des précipitations (figure 4.7) définit trois périodes :

- ◆ la saison des pluies estivales commence par quelques averses en mai qui se généralisent durant les mois de juillet à septembre et disparaissent début octobre ;
- ◆ la saison des pluies hivernales s'étend de novembre à janvier ;
- ◆ la saison sèche dure trois mois, de février aux premiers jours de mai.

En moyenne, 92% des pluies sont estivales, 7% sont hivernales et 1% tombent en saison sèche. Pour l'année 1996, première année d'observations hydrologiques, la distribution mensuelle des pluies est conforme à la moyenne interannuelle avec cependant des pluies très nettement excédentaires en septembre (148 mm au lieu de 61 mm). Par contre, en 1997 (figure 4.7) la distribution mensuelle des pluies est beaucoup plus étalée avec des valeurs mensuelles de 15 à 40 mm en hiver et pendant la saison sèche (décembre à mai) et un mois d'août exceptionnellement sec (29 mm au lieu de 108 mm).

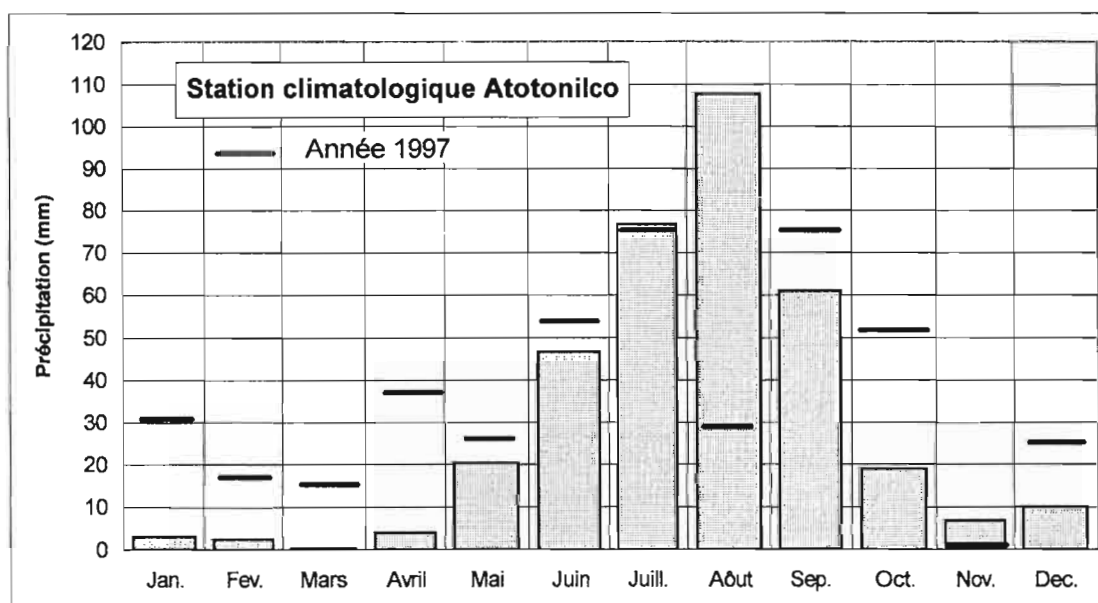


Figure 4.7. Distribution mensuelle des pluies à la station Atotonilco.

Les précipitations journalières du ranch présentent un comportement similaire à celui analysé par Nouvelot et Descroix (1997) sur l'ensemble de la RH36. Le nombre total annuel moyen de jours de pluies est de 40. On observe rarement deux averses durant la même journée. Le nombre annuel de jours de pluie correspond donc sensiblement au nombre des averses. 51% des jours de pluie ont des précipitations inférieures à 5 mm, 72 % des jours de pluie ont des précipitations inférieures à 10 mm (figure 4.8.).

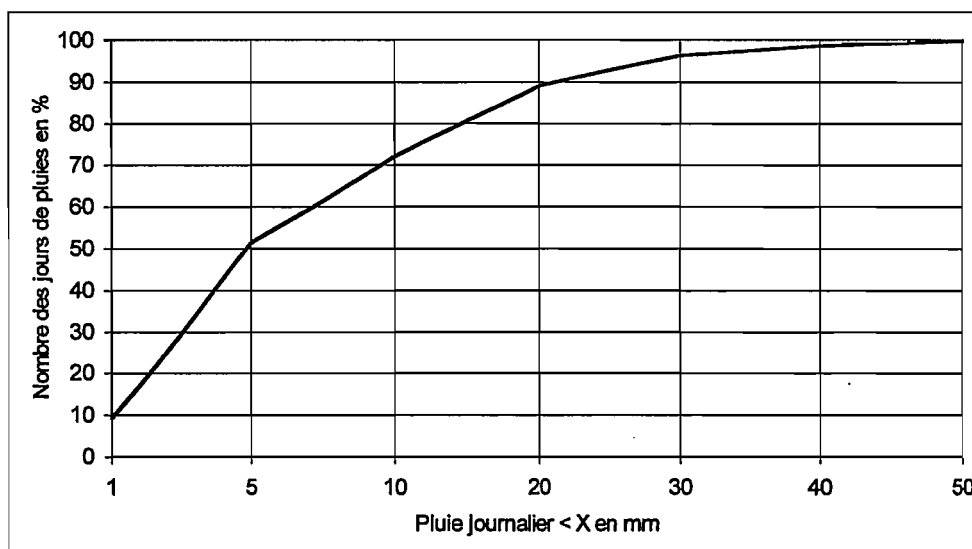


Figure 4.8. Répartition du pourcentage du nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur de la précipitation journalière (Nouvelot et Descroix 1997).

4.2.2. Géologie et relief

Du point de vue géologique, le Ranch Atotonilco se situe au contact entre l'éruptif et le sédimentaire qui traverse la RH36 selon un alignement nord-est - sud-est. Les roches et matériaux éruptifs affleurent essentiellement dans la partie sud, la plus en amont du ranch (figure 4.8), sous forme de reliefs rhyolitiques, de tables basaltiques ou de collines dacitiques, tandis que le sédimentaire est surtout représenté dans la partie nord en aval du ranch, par des matériaux détritiques grossiers de type conglomérats; les affleurements calcaires se limitent à de petits reliefs isolés dans la partie haute au sud du ranch.

Au plan lithologique, le ranch est caractérisé par le même type de roches que la RH36 :

- ✦ Des roches extrusives acides, de type rhyolite ou ignimbrite, forment des coulées indurées en bancs qui alternent avec la *toba*. Ces roches et matériaux extrusifs constituent les abrupts les plus élevés du ranch (*cerro* San Miguel, 2 400 mètres, figure 4.9), dont ils forment la limite sud au contact avec l'*ejido* La Virgen.
- ✦ Des roches extrusives acides de type dacite ou andésite affleurent dans certaines zones du ranch mais elles ne sont pas différenciées des précédentes sur les cartes géologiques (INEGI 1977 et 1978). Ces affleurements sont caractérisés par des morphologies plus douces de type collinaire qui se localisent selon un axe sud-est - nord-est entre La Coronela et Atotonilco (figure 4.10).
- ✦ Les roches extrusives basiques sont représentées par des basaltes très cristallisés, les principaux cristaux étant des feldspaths calciques et des minéraux ferro-magnésiens. Ils peuvent contenir des filons de quartz secondaire cristallisé dans les nombreuses fractures qui les affectent. Ils affleurent dans la partie centrale du ranch sous la forme de grandes tables aux bordures très arrondies, souvent prolongées topographiquement par les conglomérats. Ces ensembles peuvent atteindre l'altitude 2 000 mètres.

- ♦ Les matériaux sédimentaires détritiques grossiers sont constitués par des conglomérats basaltiques de type poudingue avec des éléments de taille décimétrique. Ils sont, comme les basaltes, localement affectés (sommets et bas de pentes) par une redistribution du carbonate de calcium, issu du matériau lui-même et susceptible de cimenter localement les éléments pierreux entre eux. Ces affleurements conglomératiques sont caractérisés par des reliefs peu accentués de type collinaire qui culminent sous l'altitude 2 000 m.
- ♦ Les roches calcaires d'âge Crétacé sont essentiellement composées de carbonate de calcium et de très peu d'argile. De ce fait, elles sont très cristallisées. Elles affleurent sous la forme de reliefs coniques, culminant autour de 2 200 mètres d'altitude, aux pentes généralement très fortes, proches de 50 % (*cerro Pilón*). Leur participation à la mise en mouvement du carbonate de calcium par dissolution est très importante, bien supérieure à celle des basaltes. Elle se manifeste par une redistribution secondaire de CaCO_3 généralisée sur tous les piémonts et glacis de contrebas, soit sous forme d'une croûte calcaire indurée (*caliche*), soit, plus en aval, sous forme d'un encroûtement calcaire tendre.
- ♦ Les alluvions et colluvions d'âge Quaternaire se localisent dans les hautes plaines de l'*arroyo Ocuila*, ainsi que dans la vallée du *rio Saucillo*.

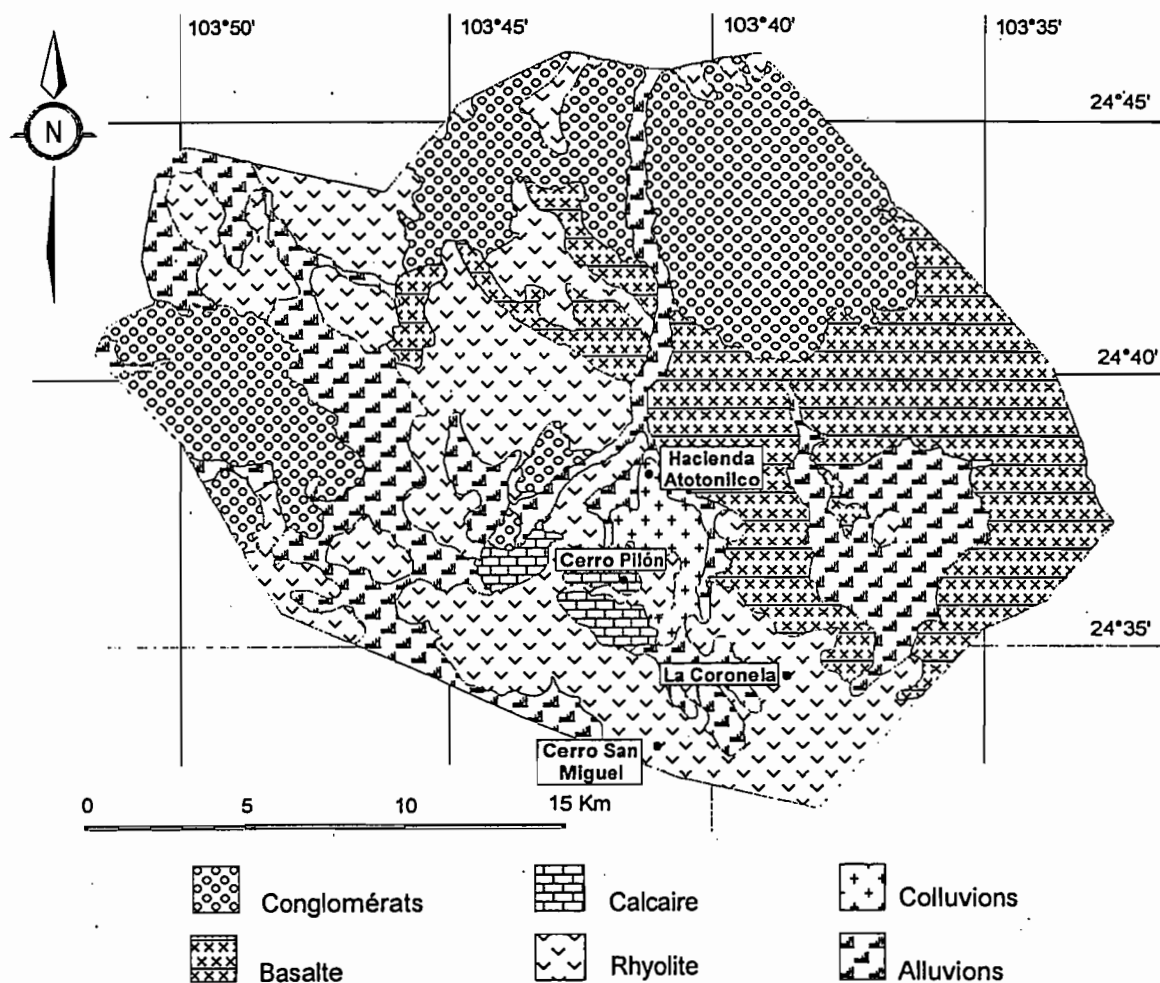


Figure 4.9. Géologie du ranch.

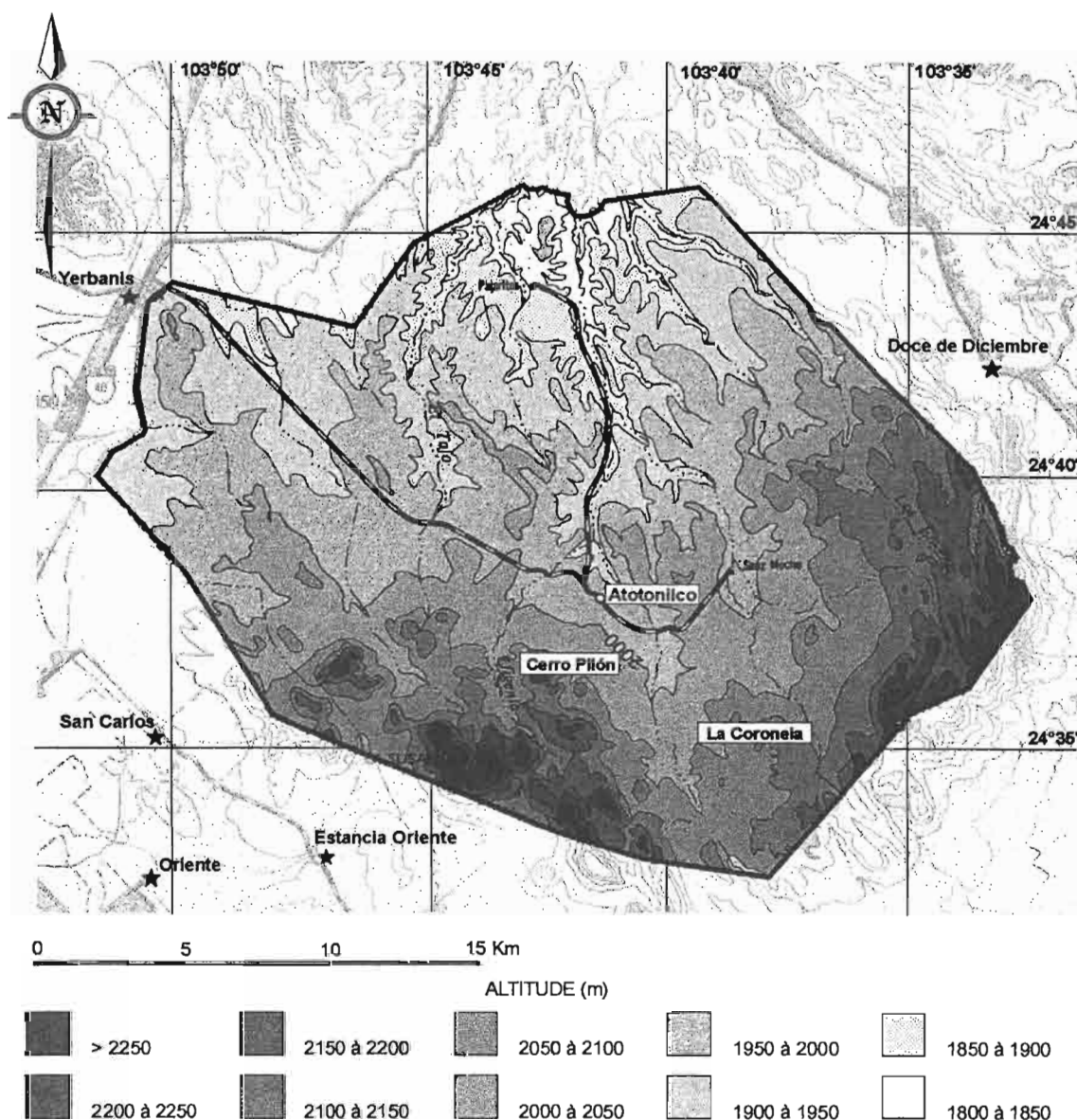


Figure 4.10. Relief du ranch.

4.2.3. Les sols

La différenciation des sols du ranch est surtout liée à la lithologie, avec des phénomènes d'érosion qui concourent à la formation de sols superficiels, soit parce qu'ils se sont faiblement développés à partir des roches et matériaux indurés, soit parce qu'ils ont été tronqués par les ruissellements hydriques. La faible agressivité du climat semi-aride actuel limite également les processus pédogénétiques.

Les Lithosols sur basaltes, rhyolites et calcaires sont représentés sur tous les massifs et affleurements rocheux. Ils se caractérisent par une profondeur faible ou nulle associée à une très faible capacité de stockage des eaux pluviales.

Les Régosols, sur matériaux géologiques tendres, sont par contre très peu représentés.

Des sols peu profonds de type Rendzina assez humifères se sont différenciés en relation avec les affleurements conglomératiques basaltiques. Leur profondeur, de quelques dizaines de centimètres, est limitée par le matériau pierreux, ou, parfois, par la présence d'une croûte calcaire indurée. Leur texture est moyenne. Ils sont très fortement caillouteux. Ces sols sont toujours associées à des unités de roche sub-affleurante (Lithosol). Sur les glacis à croûte calcaire (*cálidosos*), ces Rendzines présentent fréquemment un faciès de dégradation dû à l'érosion superficielle en nappe qui réduit leur profondeur et affecte leur richesse en matière organique.

Des sols de type Féozem rubéfié se différencient à partir des roches éruptives basaltiques ou rhyolitiques. Ils sont de profondeur moyenne et sont affectés par une très forte pierrosité.

Des Xérosols profonds ont été reconnus sur les matériaux sédimentaires alluviaux ou colluviaux des zones basses plus riches en carbonate de calcium. Leurs profils, de texture moyenne et parfois grossière, peuvent être limités par la présence d'une accumulation calcaire plus ou moins indurée en profondeur.

Les sols les plus profonds du ranch sont représentés par des Castañozems et quelques unités de Vertisols développés soit dans les axes d'écoulement, soit dans les zones basses des collines dacitiques. Ils sont de texture argileuse, souvent en association avec des Lithosols sur dacite au niveau des interfluves.

Les caractéristiques particulières des sols seront présentées de manière détaillée dans la description de chacun des sites expérimentaux étudiés. D'une façon générale et hormis certains cas particuliers, les sols reconnus sont riches en matière organique, de l'ordre de 3 à 4 %; ceci est dû à une bonne utilisation des pâturages favorisant la conservation des horizons superficiels. Si une érosion laminaire se manifeste dans certains cas, elle est discontinue et limitée en extension. Les profondeurs des sols sont très variables, entre 0 et plus de un mètre, mais les sols superficiels et peu profonds sont dominants dans ces zones escarpées. Les textures sont beaucoup plus homogènes et très orientées vers un pôle équilibré (textures moyennes), avec une tendance vers des textures plus grossières. Les sols argileux, contenant plus de 40 % d'argile, sont peu représentés et limités aux quelques sols profonds de type Castañozems vertiques et Vertisols.

Ces deux facteurs, profondeur et texture, ont une influence marquée sur les caractéristiques hydriques des sols, de même que le facteur pierrosité qui affecte la majorité des sols du ranch. La pierrosité joue un rôle dans la capacité de rétention de l'eau en diminuant la proportion relative de terre fine. Les éléments grossiers peuvent cependant participer au stockage de l'eau dans le sol lorsqu'ils sont poreux, certains d'entre eux pouvant retenir plus de 10 % de leur poids en eau (Viramontes et Loyer 1999). A la surface des sols, ces éléments grossiers peuvent aussi influencer les dynamiques hydriques d'infiltration s'ils ne sont pas incrustés ou en revêtements continus (Casenave et Valentin 1989).

4.2.4. La végétation

La carte de végétation à l'échelle 1/250 000 (INEGI 1981) montre que la principale unité végétale du ranch est représentée par des pâturages naturels associés à une végétation secondaire arbustive. Elle couvre 83,6% de sa superficie, tandis que le pâturage herbeux sans arbustes et le pâturage associé au matorral ne représentent respectivement que 15,4 et 1% de la superficie du ranch (figure 4.11).

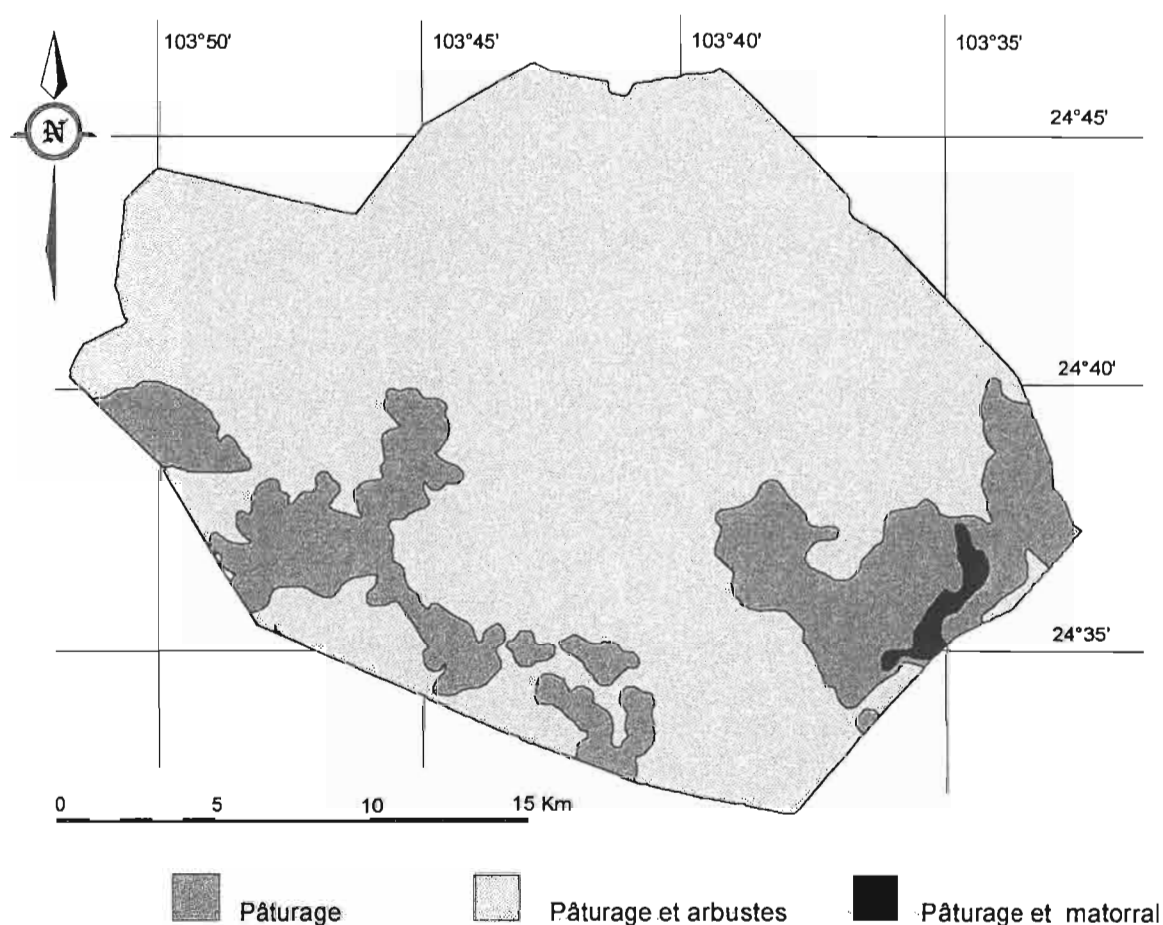


Figure 4.11. Occupation du sol sur l'ensemble du ranch.

La formation “pâturage et arbustes”, dans sa composante herbeuse, est constituée essentiellement de deux espèces de graminées : *Bouteloua gracilis* et *Prosopis glandulosa*. Sa composante arbustive est constituée d'*Acacias* et de *Prosopis*.

La formation “pâturage” est constituée par des espèces herbacées de haute valeur nutritionnelle pour le bétail : *Bouteloua gracilis*, *Sporobolus wrightii*, et *Andropogon myosuroides*. D'autres espèces apparaissent à la saison de pluie : *Santivitalia procumbens* et *Solanum elaeagnifolium*.

Les principales espèces végétales herbacées du pâturage associé au matorral sont : *Bouteloua gracilis*, *B. curtipendula*, *B. hirsuta*, *B. filiformes*, *Lycurus phleoides* et *Herteropogon controutus* et *Sporobolus sp.* qui en constitue l'espèce principale. Rappelons ici que le matorral est une formation végétale arbustive assez dense, adaptée à l'aridité.

4.3. Des activités humaines tournées vers l'élevage semi-extensif

4.3.1 Activités d'élevage

L'activité principale du ranch Atotonilco est l'élevage des bovins de race "Herford", réputée excellente pour la production de viande dont une grande partie est exportée vers les Etats-Unis. Dans une moindre mesure, le ranch se consacre également à l'élevage de chevaux destinés principalement au marché national à des fins récréatives (courses ou spectacles), ainsi qu'au travail quotidien des éleveurs (*vaqueros*).

En moyenne annuelle, le cheptel de bovins "Herford" compte un total de 3 380 têtes : 3 150 femelles et 230 taureaux. On compte également 160 têtes de bovins de race "Pardo Suizo" réservés à la production de lait pour l'autoconsommation du personnel du ranch ou pour l'allaitement des veaux en conditions critiques. Considérant la totalité du bétail, on peut dire que le ranch compte de façon permanente 3 540 têtes de bovins adultes (Barral *et al.* 1993).

La gestion de ce bétail s'effectue à partir de troupeaux d'environ 200 femelles et 10 taureaux par enclos et on estime le taux de reproduction à 80 % par an. En prenant en compte le total des femelles, y compris celles de la race "Pardo Suizo", on atteint une production proche de 2 650 veaux par an. En ajoutant les veaux au bétail adulte permanent, on peut considérer qu'il existe sur le ranch, au moins durant 8 à 9 mois de l'année, un total de 6 200 têtes de bétail bovin.

En ce qui concerne l'élevage des veaux, ceux-ci naissent en général aux mois de février et mars, pour être vendus sur place ou exportés aux Etats-Unis durant les mois de novembre et décembre de la même année. La vente se réalise pratiquement après le sevrage des animaux qui atteignent alors un poids moyen de 200 kg. Dans ces conditions d'élevage, on peut considérer que les veaux ne consomment que très peu la ressource pastorale durant leur croissance bien qu'ils contribuent à sa dégradation par leur piétinement; ils sont seulement consommateurs de la ressource hydrique.

Concernant les chevaux, en moyenne, 200 juments de race "Cuarto de milla" et quelques étalons avec pedigree sont réservées à la reproduction. Si on considère que ce bétail équin est, en théorie et pour ce qui concerne son alimentation, équivalent à 240 têtes de bétail bovin, on peut évaluer le total de la charge pastorale réelle sur le ranch à une unité animale pour 11,7 hectares, alors que le coefficient potentiel estimé à partir de la productivité pastorale des sols serait de 8 à 10 hectares par unité animale (Barral *et al.* 1993).

4.3.2 Gestion et usage de l'eau

Deux stratégies principales sont utilisées par les producteurs du ranch pour abreuver le bétail : la pose d'abreuvoirs alimentés par des eaux souterraines et la construction des petits barrages (*presones*) pour le stockage des eaux superficielles.

Environ 300 abreuvoirs sont alimentés par gravité à partir d'un très grand réseau de conduites distribuant l'eau de puits implantés sur les parties hautes des reliefs. Ce type de distribution se heurte à divers problèmes pratiques comme la détérioration des tuyaux en PVC qui, bien qu'enterrés à 10 cm de profondeur, sont constamment mâchés par le bétail. Durant les périodes de réparation, tant du réseau de distribution que des puits, l'alimentation en eau des abreuvoirs est effectuée à partir de camions citernes.

L'autre alternative pour assurer l'abreuvement est la mise en place de petits *presones*, dont les premiers furent installés dès la fin du siècle précédent. A l'intérieur du ranch, on en compte aujourd'hui plus de 50 dont la capacité de stockage varie entre 3 000 et 30 000 m³. Ils sont entretenus par grattage des sédiments et, à l'occasion, agrandis selon des critères empiriques propres à chaque gestionnaire de quartier (*fracción*). Dans certains cas, les eaux superficielles qui y sont stockées peuvent se maintenir toute l'année, mais, dans la majorité des cas, les eaux ne s'y maintiennent que durant 3 ou 4 mois après la saison des pluies (novembre à février).

4.4. Conclusion

Avec une moyenne annuelle de 427 mm de précipitations pluviales, le ranch Atotonilco se situe dans la zone de transition entre le climat sub-humide de la partie la plus haute de la RH36 (*sierra*) et le climat aride de la haute plaine endoréique (*Comarca Lagunera*). Il se caractérise par une production agricole centrée sur l'élevage de bovins généralement exportés vers les Etats Unis, une quantité minime de la production étant réservée à la consommation nationale. Ce ranch peut être considéré comme représentatif du type d'exploitation pratiqué dans les propriétés privées du Nord-Mexique, essentiellement dans les Etats de Durango, Coahuila et Chihuahua.

Dans ces unités de production, la disponibilité et la gestion locale de l'eau sur l'ensemble de l'exploitation est indispensable à sa rentabilité. Diverses alternatives sont mises en oeuvre pour éviter au bétail de parcourir de longues distances, ce qui affecte la qualité de la viande. Dans le cas du ranch Atotonilco, des abreuvoirs, alimentés par un large réseau de petites canalisations enterrées distribuant l'eau des puits par gravité, sont utilisés conjointement aux petites retenues temporaires, parfois pérennes.

Quel rôle jouent donc les petits barrages dans l'abreuvement du bétail ? Quelle est et pourrait être l'utilité de ces petits aménagements dans le cadre d'une gestion rationnelle des ressources hydriques à l'échelle du ranch ? Nous tenterons, dans cette thèse, de répondre à ces questions.

DEUXIEME PARTIE

LES SITES EXPERIMENTAUX : OBSERVATIONS ET DESCRIPTIONS

CHAPITRE 5 : Sélection et description des sites expérimentaux

CHAPITRE 6 : Observations climatiques

CHAPITRE 7 : Mesures hydrologiques

CHAPITRE 5

SELECTION ET DESCRIPTION DES SITES EXPERIMENTAUX

5.1. Objectifs

L'objectif général du travail présenté ici est d'analyser le fonctionnement hydrologique des petites retenues artificielles du ranch Atotonilco. En d'autres termes, il s'agit de déterminer les apports liquides et solides, les pertes par infiltration et par évaporation au niveau de ces retenues qui servent au stockage d'eaux superficielles destinées principalement à l'abreuvement du bétail, principale production du ranch.

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à la description des paramètres non climatiques, physiques et biotiques, intervenant dans le calcul des apports liquides et solides. Nous traiterons dans le chapitre suivant des paramètres climatiques.

Pour le calcul des apports en eaux superficielles, interviennent essentiellement les caractéristiques hydrodynamiques des sols, fonctions de la nature des matériaux géologiques, de la texture et de la structure des sols ainsi que de leur couverture végétale. Sols et matériaux géologiques s'organisent en systèmes séquentiels morpho-lithologiques qu'il conviendra de décrire afin de comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins versants. La topographie intervient principalement sur la forme des hydrogrammes de crue, sur la nature et la quantité de matériaux solides transportés par les eaux de ruissellement. La couverture végétale protège les sols contre l'agressivité des pluies et du ruissellement. Elle constitue donc un facteur limitant de l'érosion et par conséquent des volumes de sédiments déposés dans les retenues.

5.2. Choix des sites expérimentaux

Le choix des sites expérimentaux (bassins versants, parcelles et retenues) doit permettre l'extrapolation des résultats obtenus à l'échelle du ranch et, si possible, à l'échelle régionale. La sélection des sites expérimentaux a été réalisée en s'appuyant sur une analyse des différents documents cartographiques régionaux de l'INEGI : cartes topographique, géologique, pédologique et d'occupation du sol. Cette analyse cartographique a été complétée par des reconnaissances de terrain effectuées au cours de l'année 1995 (Viramontes et Loyer 1999; Anaya 1998). Deux échelles d'observation ont été retenues : des petits bassins versants de 0,2 à 4 km² et des parcelles expérimentales de 1 à 60 m².

5.2.1. Choix des bassins versants expérimentaux

Deux critères principaux ont servi à sélectionner les bassins versants expérimentaux : leurs différents substrats géologiques et leurs structures morpho-pédologiques plus ou moins complexes. Selon la position de la retenue par rapport à son impluvium, trois types de systèmes morpho-lithologiques séquentiels ont été considérés comme représentatifs du milieu physique du ranch :

- ♦ **un système séquentiel unitaire** composé par le versant d'un relief. Deux bassins versants ont été choisis pour représenter ce système sur les lithologies rencontrées le plus fréquemment dans le ranch : la rhyolite (roche ignée acide, bassin *El Viejo*) et les conglomérats basaltiques (roche ignée basique, bassin *Oso Negro*).
- ♦ **un système séquentiel binaire** comprenant un versant prolongé par un glacis d'épandage. Le relief de commandement peut être un basalte (bassin *El Molino*), un calcaire (bassins *Carboneras* et *El Muerto*).
- ♦ **un système séquentiel ternaire**, constitué d'une séquence à trois composantes : versant, glacis et zone d'accumulation colluvio-alluviale. Deux reliefs de commandement ont été sélectionnés pour représenter ce système : le relief rhyolitique (bassin versant *El Tullido*) et le relief calcaire (bassin *El Pastelero*).

La formation géologique la plus importante du ranch Atotonilco est la rhyolite (30 % de la superficie totale). Deux bassins sont installés sur cette formation. Dans l'ordre d'importance on trouve ensuite les conglomérats (25 %) et les basaltes (20 %). Un bassin versant a été implanté sur chacune des ces deux formations. Les alluvions couvrent 15 % de la superficie du ranch et sont prises en compte dans les parties aval des bassins versants *El Tullido* et *El Pastelero*. Les calcaires ne couvrent que 5 % de la superficie du ranch et sont cependant représentés par les bassins *Carboneras* et *El Muerto*.

Du point de vue géomorphologique, les glacis, haut et bas glacis situés approximativement entre 2000 et 2100 m d'altitude, couvrent environ 45 % de la superficie du ranch et sont plus particulièrement présents sur les bassins *El Tullido* et *El Pastelero*. Les collines couvrent 40 % de la superficie du ranch et la totalité des bassins *Oso Negro* et *El Molino*. Les reliefs montagneux ne couvrent que 15 % de la superficie du ranch, au-dessus de l'altitude 2100 m, mais sont bien représentés dans l'échantillon avec les bassins *El Viejo*, *Carboneras* et *El Muerto*.

5.2.2. Choix des parcelles expérimentales

Les observations sur parcelles expérimentales doivent permettre une analyse plus fine de la relation pluie-débit que celles réalisées à l'échelle des bassins versants, il s'agit plus particulièrement de quantifier les effets de la pente, du couvert végétal et du sol sur le ruissellement et l'érosion superficielle.

Deux sites ont été choisis pour installer huit parcelles expérimentales : un site sur un versant calcaire du bassin *Carboneras*, l'autre sur un versant rhyolitique du bassin *El Viejo*. Deux types de pente ont été considérés dans les deux cas : de 8 à 10 % en bas versant, de 18 à 20 % à mi-versant.

Sur chaque type de pente deux parcelles ont été installées : l'une couverte d'une végétation herbacée " pâturage " l'autre d'une végétation arbustive et herbacée " matorral et pâturage " avec cactées sur le bassin *El Viejo*, sans cactées sur le bassin *Carboneras*.

5.3 Description des bassins

5.3.1. Géologie

Le tableau 5.1 résume la répartition des formations géologiques sur les différents bassins versants, sachant que les principales formations géologiques de la région Atotonilco sont :

- ♦ les roches ignées acides comprenant rhyolite et dacite,
- ♦ les roches ignées basiques (basalte),
- ♦ les roches calcaires d'âge Crétacé supérieur,
- ♦ les roches détritiques acides (toba) et basiques (conglomérats basaltiques),
- ♦ les colluvions et alluvions du Quaternaire.

Tableau 5.1. Pourcentages de recouvrement des formations géologiques sur les bassins.

Bassin versant	Rhyolite Dacite Toba	Basalte	Conglomérat basaltique	Calcaire	Colluvions Alluvions	Superficie du bassin (ha)
Système séquentiel unitaire						
El Viejo	100					176
Oso Negro			100			27
Système séquentiel binaire						
El Muerto				60	40	15
El Molino		100				15
Système séquentiel ternaire						
Carboneras	53			28,4	18,6	106
El Pastelero			16,7	15,3	68	168
El Tullido	57,4				42,6	398

Bassins versants sur roches ignées acides

Deux bassins versants sont situés sur roche acide (rhyolite) : *El Viejo* et *El Tullido*. Le bassin *El Viejo*, d'une superficie de 176 ha, est coiffé d'une corniche de rhyolite à laquelle succèdent, sur le versant, des éboulis et des matériaux hétérogènes (*toba*). Le versant se termine par une fine bande alluviale-colluviale.

Le bassin de *El Tullido* (398 ha.) est situé entièrement sur rhyolite. Un long glacis d'érosion couvert de colluvions cimentées par du carbonate de calcium (*caliche*) fait suite aux versants rhyolitiques. La croûte calcaire indurée est continue et recouvre aussi bien les matériaux sédimentaires (colluvions) que le matériel rhyolitique, imprégné par du carbonate de calcium d'origine exogène. La partie basse de la séquence est constituée d'une unité mixte alluviale et colluviale.

Bassins versants sur roches ignées basiques

Deux petits bassins versants sont situées sur basalte et conglomérat basaltique : *El Molino* et *Oso Negro*.

Le petit bassin *El Molino* (15 ha) est caractéristique des affleurements basaltiques à morphologie collinaire largement représentés au nord du ranch.

Le bassin *Oso Negro* (27 hectares) est représentatif des lithologies détritiques grossières basiques largement représentées dans le ranch (25 %).

Bassins sur roches calcaires

Un seul bassin versant est situé uniquement sur roche calcaire : *El Muerto*. D'une superficie de 15 ha, il est composé d'une corniche prolongée; dès le haut du versant, par une croûte calcaire à laquelle succède ici, avec un fort contraste de pente, un glacis d'épandage colluvial aboutissant au *presón*.

Bassins versants hétérogènes

Deux bassins versants sont très partiellement recouverts par des roches carbonatées : *Carboneras* (28,4%) et *Pastelero* (15,3%).

En continuité avec la partie amont, les matériaux colluviaux forment un petit glacis d'accumulation prolongé près des axes d'écoulement par des matériaux alluvio-colluviaux sur lesquels se sont différenciés des sols profonds.

Le bassin versant *El Pastelero* (168 ha) est formé de reliefs calcaires et d'un long glacis d'érosion couvert de colluvions cimentées par du carbonate de calcium (*caliche*). La croûte calcaire indurée est continue. Elle recouvre aussi bien les matériaux sédimentaires (colluvions) que le matériel rhyolitique imprégné par du carbonate de calcium. La partie basse de la séquence est constituée d'une unité conglomératique basique sur laquelle est implanté le *presón*.

5.3.2. Morphologie

Les trois systèmes morphologiques rencontrés sur le ranch Atotonilco sont caractérisés par :

- un seul versant à pente forte (20 à 30 % sur les reliefs ; 10 à 20 % sur les collines) pour le système *unitaire*;
- un versant prolongé par un glacis à pente plus faible (5 à 15 %) pour le système *binair* ;
- un versant prolongé par un glacis à pente plus faible, puis par une zone colluvio-alluviale de pente encore plus faible (3 à 5 %) associée à l'axe d'écoulement pour le système *ternaire*.

Quatre nuances de gris dégradé ont été utilisées pour représenter les formes de reliefs sur les cartes morphologiques (figure 5.1, figure 5.2 et annexes V.1.1 à V.1.5). Le gris le plus foncé a été utilisé pour représenter les pentes les plus fortes (> 20 %), le blanc pour les zones colluvio-alluviales de pente inférieure à 5 %.

Tableau 5.2. Pourcentages de recouvrement des formes de relief.

Bassin versant	Reliefs à pente > 20 %	Collines à pente 10 à 20 %	Glacis à pente 5 à 15 %	Zone colluvio-alluviale à pente de 3 à 5 %	Superficie du bassin (ha)
Système séquentiel unitaire					
El Viejo	100				176
Oso Negro		100			27
Système séquentiel binaire					
El Muerto	73		27		15
El Molino		73	27		15
Système séquentiel ternaire					
Carboneras	66		13	21	106
El Pastelero	23		67	10	168
El Tullido	5	3	86	6	398

Système unitaire

Les bassins *El Viejo* et *Oso Negro* sont représentatifs de ce système.

Le bassin *El Viejo* est situé sur des reliefs qui culminent à plus de 2300 m. Ses deux versants peuvent être considérés comme symétriques. Leur pente générale est de 30 à 40%. Ils se terminent directement dans l'*arroyo* sur lequel a été construit le *presón*.

Le bassin versant *Oso Negro* est situé sur un relief de collines dont les sommets ne dépassent pas 1900 m. Les versants ont une pente moyenne de 19% et plongent directement dans l'axe d'écoulement, sans terrasse alluviale intermédiaire.

Système binaire

Ce système est représenté par les bassins versants *El Muerto* et *El Molino*.

Le bassin *El Muerto* est formé d'un seul versant à pente forte, prolongé par un petit glacis d'épandage colluvial à pente assez forte (10 à 15 %). La succession séquentielle est relief-glacis. La pente moyenne pondérée de l'ensemble est de 27 %.

Le bassin *El Molino* se décompose en un versant situé en bordure d'une table basaltique (18 % de pente), auquel succède un cône d'épandage colluvial à pente douce (5 %) aboutissant au *presón*.

La figure 5.1 présente la morphologie collinaire du bassin versant *El Molino*.

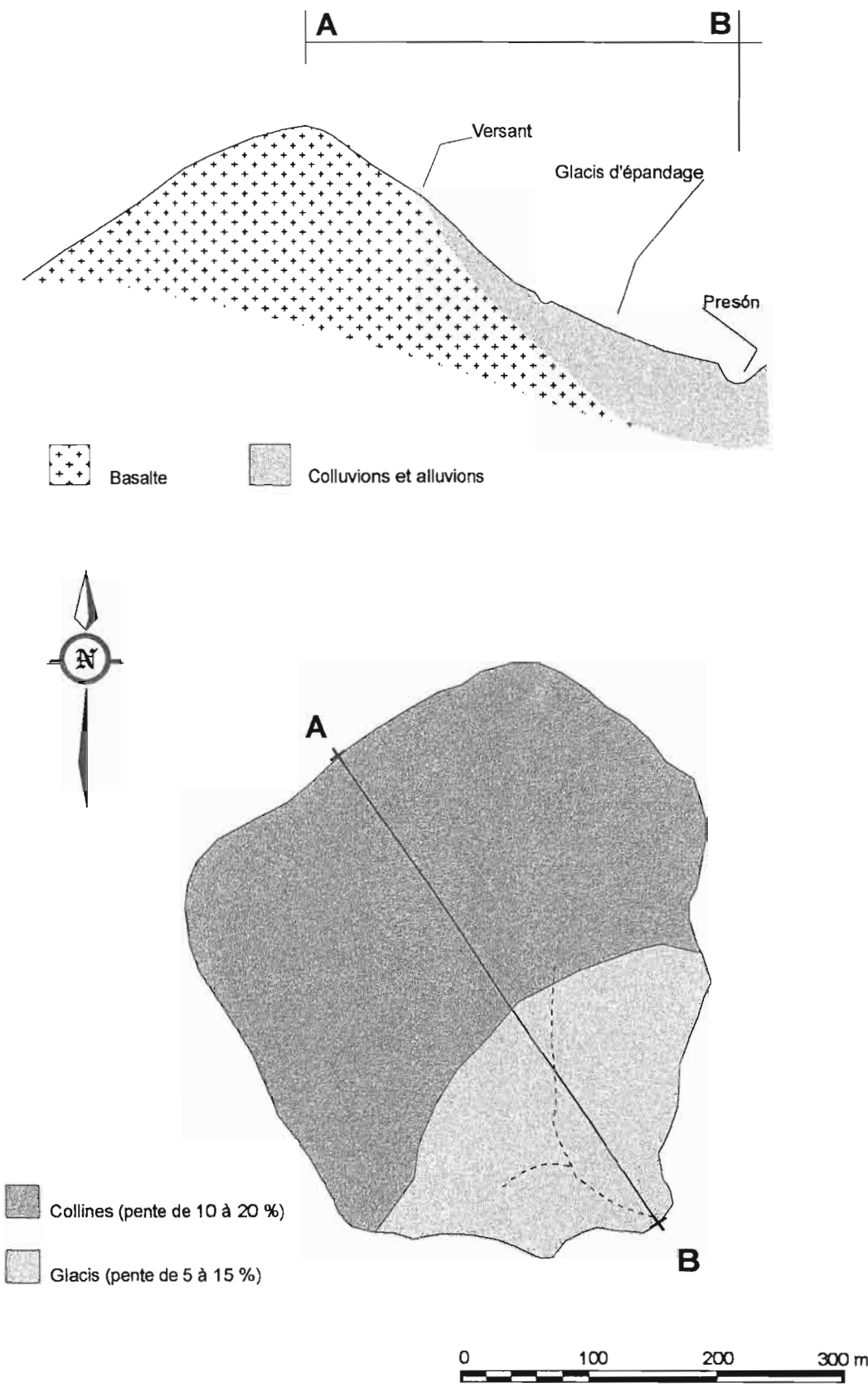


Figure 5.1. Morphologie collinaire du bassin versant *El Molino*.

Système ternaire

Les bassins versants *Carboneras*, *El Pastelero* et *El Tullido* sont représentatifs de ce système.

Le bassin *Carboneras* est similaire à celui d'*El Muerto* mais il est constitué de deux versants à pente forte, prolongés par deux glacis d'épandage et par une zone colluvio-alluviale à pente encore plus faible (3 à 5 %), associée à l'axe d'écoulement.

Les deux bassins versants *El Pastelero* (168 ha) et *El Tullido* (398 ha) diffèrent par leurs reliefs de commandement : calcaire pour *El Pastelero*, rhyolitique pour *El Tullido*. Sur ces deux bassins, dans la continuité des reliefs à pente forte (20 à 30 %), un long glacis d'érosion, cimenté par du carbonate de calcium (*caliche*) prolonge la séquence avec des pentes nettement plus faibles : 5 à 10 % pour le haut glacis, 3 à 5 % pour le bas glacis. La croûte calcaire indurée est continue. Elle recouvre aussi bien les colluvions que le matériel rhyolitique. La partie basse de la séquence est constituée d'une unité colluvio-alluviale à pente faible (3 %).

La figure 5.2 présente la morphologie du bassin versant *Carboneras*, caractéristique des zones de "reliefs".

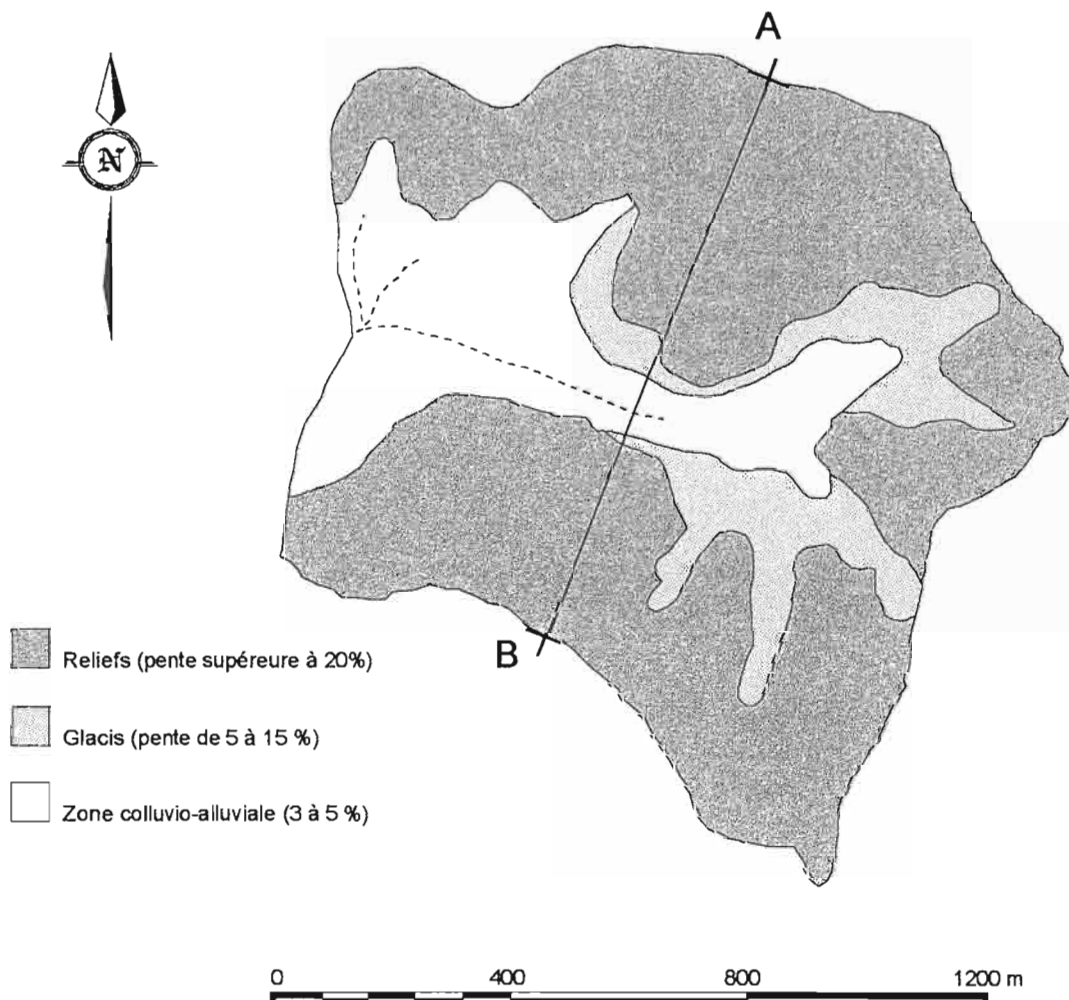


Figure 5.2. Morphologie du bassin versant de *Carboneras*, caractéristique des zones de "reliefs".

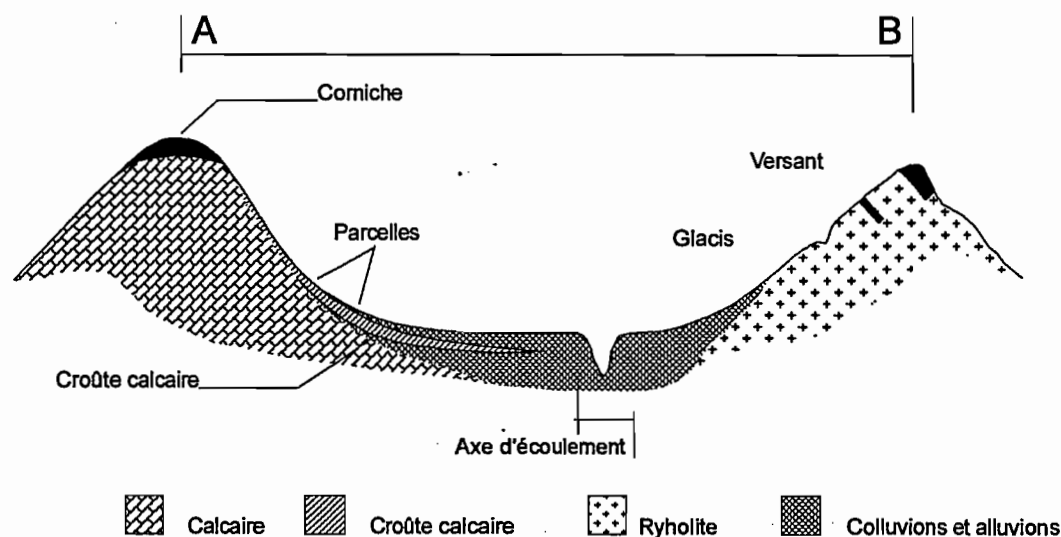


Figure 5.2 (bis). Morphologie du bassin versant de *Carboneras*, caractéristique des zones de "reliefs", coupe A B.

5.3.3. Pédologie

Les sols du ranch Atotonilco ont été caractérisés par leur épaisseur, la présence d'une croûte calcaire indurée, leur texture et leur pierrosité (Viramontes et Loyer 1999). Ces quatre caractéristiques sont susceptibles d'influencer de manière différente l'infiltration des eaux superficielles.

Le tableau 5.3 présente les pourcentages de superficie des bassins versants en fonction de la profondeur des sols et de leur croûte calcaire indurée.

Le tableau 5.4 présente les pourcentages de superficie des bassins versants en fonction de la texture de la terre fine et de la pierrosité superficielle des sols.

Les cartes pédologiques des bassins versants (figure 5.4 et Annexes V.2.1 à V.2.6) ont été réalisées en utilisant cinq nuances de gris pour caractériser l'épaisseur des sols, une trame à double trait pour représenter la croûte calcaire, une combinaison des lettres L (limon), S (sable) et A (argile) pour représenter la texture de la terre fine et les trois chiffres 1, 2 et 3 pour marquer le degré de pierrosité de la plus faible (1 : 0 à 25 % du volume de sol) à la plus forte (3 : plus de 50 %).

Les croûtes calcaires

Nous avons sélectionné a priori la croûte calcaire comme premier critère hydropédologique susceptible de limiter l'infiltration car l'examen des profils pédologiques montrent l'existence de cette croûte à faible profondeur sur les versants au sud du ranch. La redistribution du carbonate de calcium le long de ces versants affecte en effet aussi bien les reliefs que les glacis, parfois même sans

relation avec la nature du substratum. En général, l'encroûtement des versants est associé à l'existence de massifs calcaires en amont. Cependant, on observe également des croûtes calcaires sur des sols issus de conglomérats basaltiques (bassin versant *Oso Negro*) et de rhyolite (bassin versant *El Tullido*). L'accumulation calcaire apparaît à faible profondeur sous deux formes : une croûte dure, consolidée, de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur et un encroûtement tendre, plus ou moins épais, non consolidé. Cette seconde forme d'accumulation se rencontre le plus souvent sur les conglomérats basaltiques et sur la partie basse des glacis.

Les bassins versants à croûte calcaire consolidée sont : *El Pastelero* (71 % de sa superficie) *El Muerto* (54 %) *El Tullido* et *Carboneras* (39 %) figure 5.2.

Les bassins versants à croûte calcaire peu différenciée sont *Oso Negro* (36 % de sa superficie) et *El Molino* (14 %) sur leurs parties les plus hautes, *El Tullido* (24 %) et *El Pastelero* (8 %) sur leurs bas glacis.

La profondeur du sol

Le second critère hydropédologique susceptible de limiter l'infiltration est la profondeur du sol, lorsque le substratum sous-jacent peut être considéré comme imperméable.

Cinq classes de profondeur ont été considérées :

- ♣ classe 0 : sols squelettiques sur roches dures (*Lithosols*),
- ♣ classe 1 : sols superficiels de profondeur inférieure à 30 cm (*Rendzines*),
- ♣ classe 2 : sols peu profonds de profondeur comprise entre 30 et 50 cm (*Rendzines*),
- ♣ classe 3 : sols semi-profonds de profondeur comprise entre 50 et 80 cm (*Féozems* et *Xérosols*),
- ♣ classe 4 : sols profonds de profondeur comprise entre 80 et 120 cm (*Xérosols*, *Vertisols* et *Castañosols*),
- ♣ classe 5 : sols très profonds de profondeur supérieure à 120 cm (*Vertisols* et *Castañosols*).

Les sols les moins épais (classes 0 et 1) se rencontrent sur les reliefs, les versants et les glacis des bassins *El Muerto* (74 % de sa superficie), *El Pastelero* (73 %), *Oso Negro* (70 %) et *El Tullido* (42 %).

Les sols de moyenne profondeur (classes 2 et 3) sont surtout présents sur les bassins *El Viejo* (51 % de sa superficie) *Carboneras* (48 %) *El Molino* (45 %). Ils sont également présents, mais en plus faible proportion, sur les bassins *Oso Negro* (30 %), *El Tullido* (24 %) et *El Pastelero* (23 %).

Les sols profonds (classes 4 et 5) couvrent principalement les zones colluvio-alluviales des bassins *El Molino* (42 %) *El Tullido* (36 %) et *El Viejo* (30 %) mais aussi celles des bassins *Carboneras* (27 %) et *El Muerto* (26 %).

Tableau 5.3. Profondeur et encroûtement des sols sur les bassins versants.

Encroûtement	Avec croûte calcaire						Sans croûte calcaire						Superficie du bassin
Classes de profondeur	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	
Système séquentiel unitaire													
El Viejo							5,7	13,5		50,7	21,2	8,9	175,8
Oso Negro	36,6						12,1	21,1	14,7	15,5			27,2
Système séquentiel binaire													
El Muerto		54,2					19,9					25,9	14,8
El Molino		13,6								44,9	14,9	26,6	14,7
Système séquentiel ternaire													
Carboneras	8,7	17,0	13,7							34,0	5,9	20,7	106,0
El Pastelero	13,3	58,0	14,6	8,2			1,4		1,2			3,3	157,9
El Tullido	9,2	29,9	6,0		23,8		0,4	2,0	16,6		6,8	5,3	398,1

La superficie du bassin est exprimée en hectares.

Texture

La texture superficielle des sols (sur une profondeur de 0 à 10 cm) varie de la texture sablo-limoneuse à la texture franchement argileuse (plus de 60 % d'argile). Six catégories ont été définies :

- Sablo-limoneuse (S-E), plus de 70 % de sable et moins de 15 % d'argile,
- Limono-sableuse (E-S), plus de 50 % de sable et moins de 30 % d'argile,
- Limono-sablo-argileuse (E-A-S), plus 60 % et moins de 45 % d'argile,
- Limoneuse (équilibrée, E) de 25 à 50 % d'argile et 40 à 60 % de sable,
- Limono-argileuse (A-E), 40 à 60 % de sable et 40 à 60 % d'argile,
- Argileuse (A), plus de 50 % d'argile.

- ♦ Les sols sablo-limoneux se rencontrent exclusivement sur le bassin *Carboneras* (14 % de sa superficie).
- ♦ Les sols limono-sableux sont présents sur la plupart des bassins : *Oso Negro* (100 %), *El Pastelero* (74 %), *Carboneras* (72 %), *El Muerto* (32 %) et *El Tullido* (10 %).
- ♦ Les sols limono-sablo-argileux sont peu fréquents. Ils se rencontrent presque exclusivement sur les bassins *El Tullido* (23 %) et *El Viejo* (10 %).
- ♦ Les sols à texture équilibrée (limoneux) couvrent les bassins *El Tullido* (68 %), *El Viejo* (64 %), *El Molino* (60 %), *El Muerto* (42 %) et, dans une moindre mesure, *El Pastelero* (23 %).
- ♦ Les sols à texture plus argileuse (limono-argileux et argileux) sont présents sur les bassins *El Molino* (40 %), *El Muerto* (26%) et *El Viejo* (21 %).

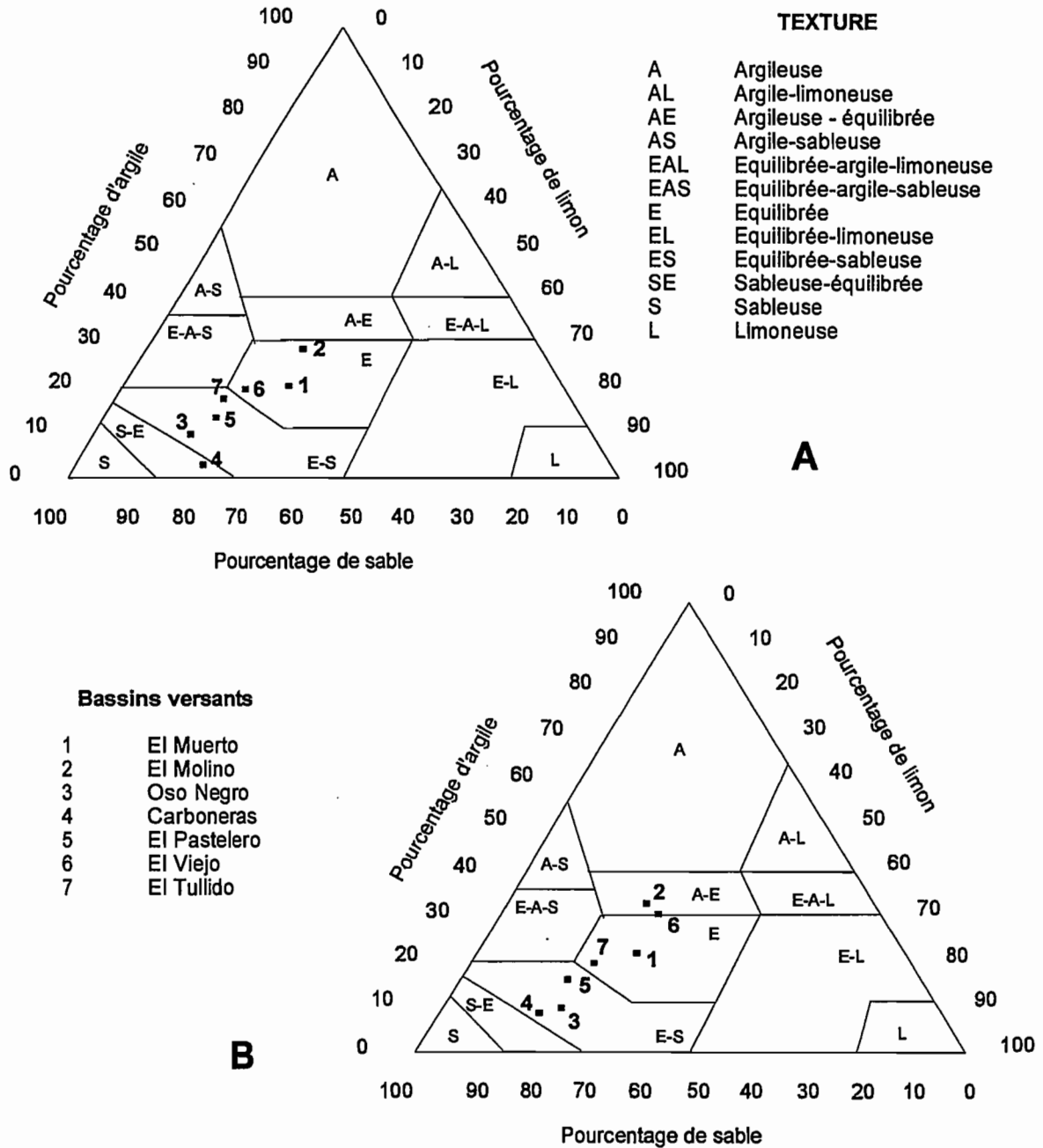


Figure 5.3. Triangle de texture des sols des bassins versants en considérant les 10 premiers centimètres de profondeur (A) et le sol total (B).

De manière générale, les sols sur matériaux calcaires et sur conglomérats basaltiques sont à dominante limono-sableuse (figure 5.3). Les sols sur matériaux ignés acides (rhyolite) sont surtout de texture équilibrée et les sols sur basalte essentiellement limono-argileux à argileux. Les zones colluvio-alluviales s'enrichissent en éléments fins : elles sont plus argileuses que les versants sur basalte, plus limoneuses que les versants et glacis sur roches carbonatées ou ignées acides.

Pierrosité

Trois classes de pierrosité ont été créées par l'INEGI :

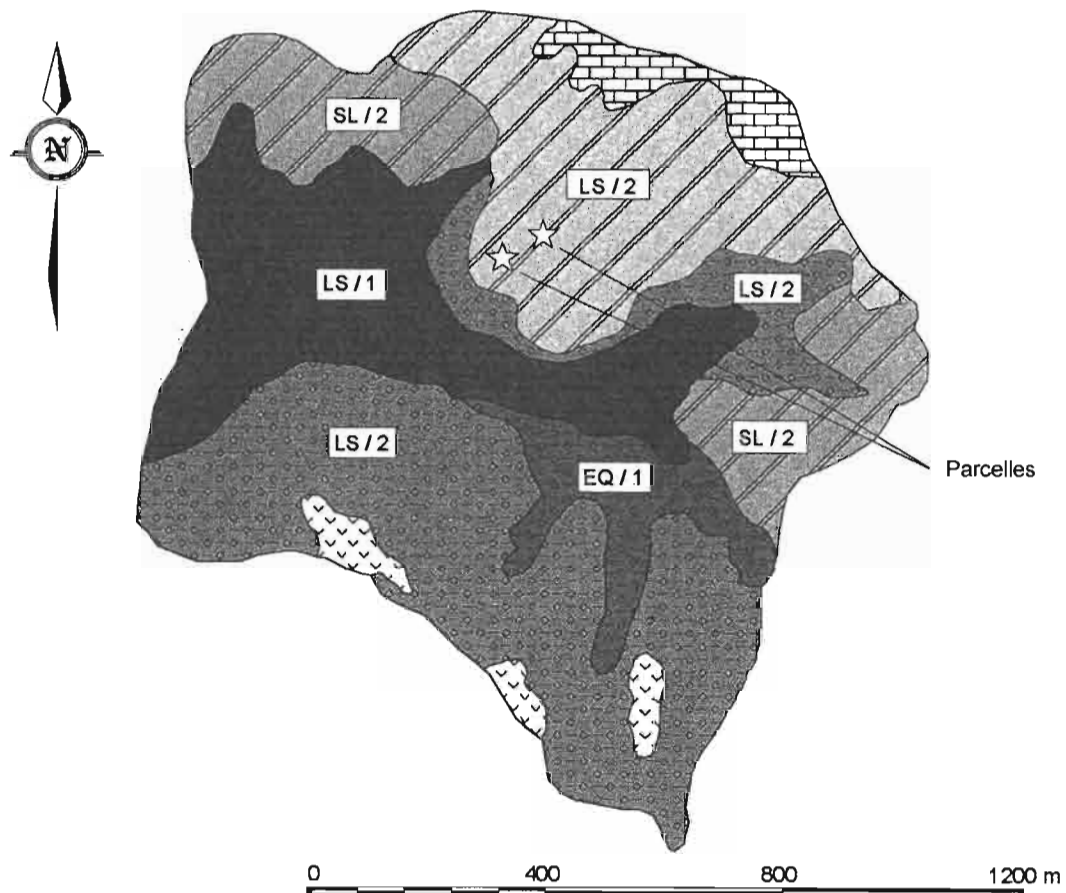
- ♦ faible (classe 1), 0 à 25 % du volume de sol,
- ♦ moyenne (classe 2), 25 à 50 % du volume,
- ♦ forte (classe 3), plus de 50 % du volume du sol.

La pierrosité correspond aux éléments grossiers de taille supérieure à 2 cm, c'est à dire aux cailloux et aux graviers.

Les bassins à très forte pierrosité sont *Oso Negro* (70 % de sa superficie) et *El Molino* (60 %). La plupart des autres bassins versants ont une pierrosité moyenne. Les bassins les moins pierreux sont *El Tullido* (36 % de sa superficie en classe 1), *El Muerto* et *Carboneras* (26 et 27 % de leurs superficies en classe 1). De manière générale, la pierrosité est associée à la pente du terrain. Elle est faible dans les zones colluvio-alluviales. Elle est également associée à la nature du substratum : elle est particulièrement forte sur les conglomérats basaltiques (*Oso Negro*) et sur le basalte (*El Molino*).

Tableau 5.4. Texture et pierrosité en pourcentages de la superficie des bassins versants.

Texture	-	SL	LS	LSA	Eq	LA	A	Sup.
Pierrosité	-	2 1	2 3	1 2	1 2 3	2 3	1 2	(ha)
Système unitaire								
El Viejo		15,5	14,7 69,8					175,8
Oso Negro	5,7			8,9	13,5 50,7	21,2		27,2
Système binaire								
El Muerto			19,9 12,3		41,9		25,9	14,8
El Molino					59,8	13,6	26,6	14,7
Système ternaire								
El Tullido			9,6	22,5	36,0 31,9			398,1
El Pastelero			74,3	3,1	7,7 14,9			167,6
Carboneras	8,7	13,7 20,6	51,0		5,9			106,0



PROFONDEURS DES SOLS

	Sol squelettique sur roche dure (litosol)		Sol semi-profond (50 < P < 80 cm)
	Sol superficiel (< 30 cm)		Sol profond (80 < P < 120 cm)
	Sol peu profond (30 < P < 50 cm)		Sol très profond

MATERIAUX

	Calcaire		Colluvions - Eboulis		Croûte calcaire		Rhyolite		Alluvions

Figure 5.4. Carte pédologique du bassin versant *Carboneras*.

5.3.4. Végétation

On distingue quatre types de végétation sur les différents bassins versants expérimentaux du ranch Atotonilco : les végétations herbacée, arbustive buissonnante, arborée et xérophile à plantes grasses.

La végétation herbacée (pâturage) est formée de graminées et de plantes annuelles en tapis plus ou moins dense. Parmi les 34 espèces de graminées identifiées sur les bassins versants, on peut distinguer deux espèces dominantes : *Bouteloua gracilis*, localisée sur les parties basses des glacis, et *Sporobolus sp.* caractéristique des zones alluviales et colluviales.

La végétation buissonnante (*matorral*) est constituée d'arbustes de taille inférieure à 2 mètres, parmi lesquels on peut distinguer trois espèces dominantes : *Acacia constricta*, *Pithecellobium sp.* et *Mimosa biuncifera*.

La végétation arborée est formée d'arbres de taille supérieure à 2 mètres parmi lesquels *Acacia shaffneri* et *Acacia farnesiana* sont les éléments dominants. Elle est principalement localisée sur les parties basses des glacis et sur les zones colluvio-alluviales à sols profonds.

La végétation xérophile à plantes grasses (*Suculentas*) comprend une vingtaine d'espèces parmi lesquelles les cactées constituent la famille dominante avec les espèces *Opuntia* et *Mamillaria*.

La combinaison de ces quatre types de végétation permet à Anaya (1998) de distinguer 13 associations végétales dont les pourcentages de recouvrement sur les bassins versants sont présentés dans le tableau 5.5. De plus, Anaya (1998) différencie trois taux de recouvrement au niveau du sol : la classe 75 à 100% (a), la classe 50 à 75% (b) et la classe de recouvrement inférieur à 50%, tableau 5.6. Cette différenciation conduit à identifier 29 catégories de végétation prenant en compte à la fois l'association des espèces végétales et leur taux de recouvrement au sol. Les cartes de la végétation des sept bassins versants (figure 5.5 et annexes V.3.1 à V.3.6) ont été élaborées en utilisant trois nuances de gris pour caractériser les taux de recouvrement et quatre trames fondamentales pour caractériser les types de végétation.

Tableau 5.5. Pourcentages de recouvrement des associations végétales par bassin versant.

Bassin versant	Associations végétales												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Système unitaire													
El Viejo		5,7		10,5			19,9	6,3	52,6		1,8		3,2
Oso Negro								8,3	52,8	38,9			
Système binaire													
El Muerto	38,3	19,2			2,5	11,2	9,6			9,6	9,6		
El Molino							9,3					90,7	
Système ternaire													
Carboneras	17,8	29,7	5,9	13,3			15,0		1,0	10,6			6,7
El Pastelero	0,9	22,6					60,0						16,5
El Tullido	11,5	5,7	19,4	16,9			43,2				2,6		0,7

A : Pâturage
 B : Pâturage - *Matorral*
 C : Pâturage - *Matorral* arboré
 D : Pâturage arboré
 E : Pâturage - *Suculentas*
 F : *Matorral*
 G : *Matorral* - Pâturage
 H : *Matorral mixto* - Pâturage
 I : *Matorral* - Pâturage - *Suculentas*
 J : *Matorral* - *Suculentas*
 K : *Matorral* - Pâturage - *Suculentas* avec strate arborée
 L : *Suculentas* - *Matorral*
 M : Strate arborée - Pâturage

Tableau 5.6. Taux de recouvrement de la végétation au niveau du sol par bassin versant.

Bassin versant	Taux de couverture au sol			Superficie (ha)
	75 à 100 %	50 à 75 %	< 50 %	
Système unitaire				
El Viejo	27,2	41,3	31,5	176
Oso Negro	25,0	66,7	8,3	27,2
Système binaire				
El Muerto	48,0	31,2	20,8	14,8
El Molino	37,0	53,7	9,3	14,7
Système ternaire				
Carboneras	34,9	62,2	2,9	106
El Pastelero	23,1	68,2	8,7	168
El Tullido	19,4	57,1	23,5	398

Remarque : le taux de recouvrement de la végétation au niveau du sol ne comprend pas la partie épigée du couvert : feuilles des arbres et arbustes, branches, ramifications secondaires des tiges des plantes herbacées, feuilles et inflorescences.

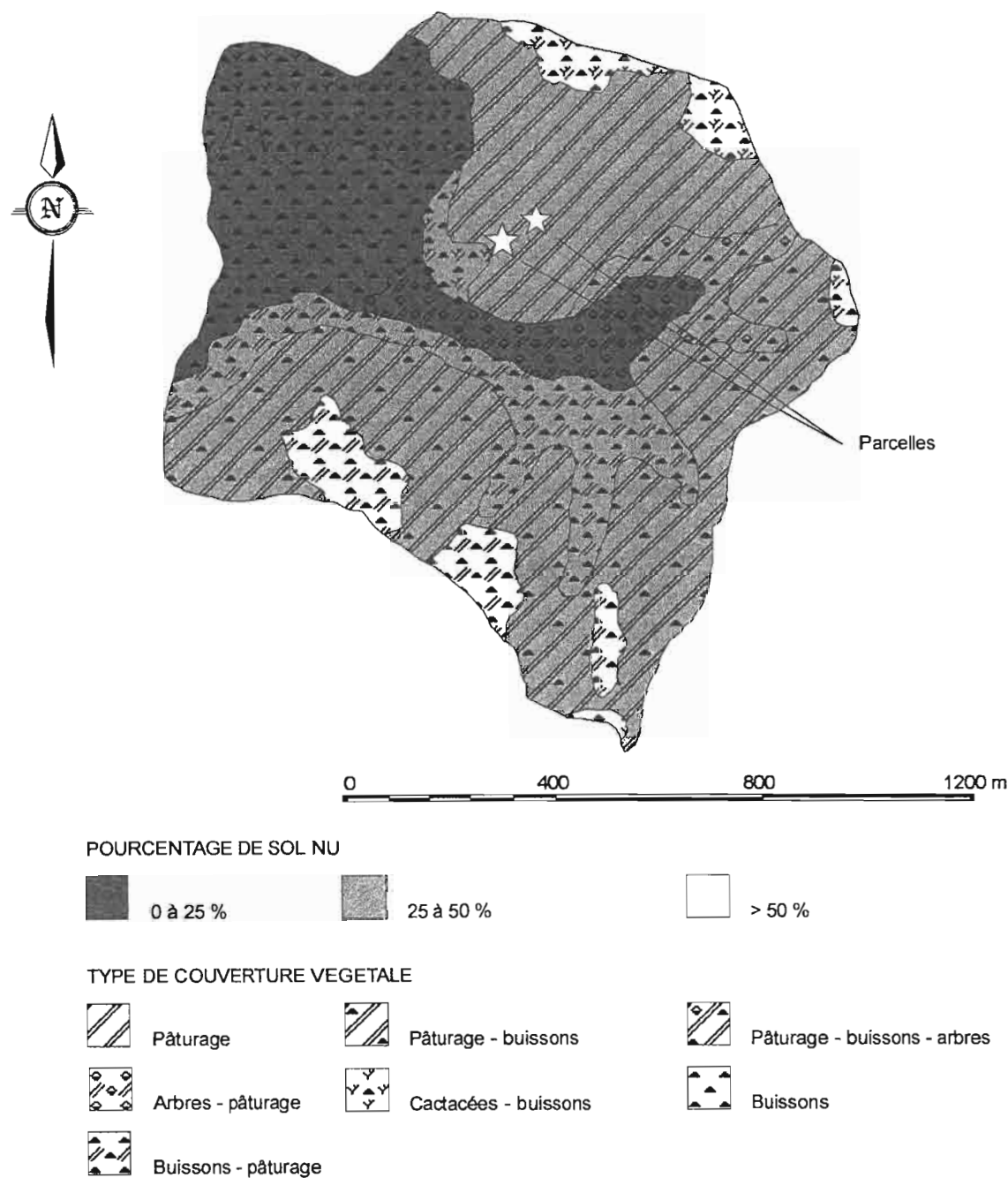


Figure 5.5. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant *Carboneras*

En ce qui concerne les associations végétales, les bassins versants *Carboneras* (67 % de sa superficie), *El Muerto* (60 %) et *El Tullido* (54 %) sont représentatifs des groupements à dominante herbacée. Leur taux de recouvrement végétal minimal au niveau du sol est supérieur à 50 % sur plus de 80% de leurs superficies. Ce taux de recouvrement végétal est susceptible de s'accroître de 20 % au moins pendant la saison des pluies.

Les bassins versants *Oso Negro* (100 % de sa superficie), *El Viejo* (80 %) et *El Pastelero* (60 %), sont représentatifs des groupements buissonnants (*matorral*). Leur taux de recouvrement végétal minimal au niveau du sol est supérieur à 50 % sur plus de 90 % de leurs superficies pour *Oso Negro* et *El Pastelero*, plus de 70 % pour *El Viejo*.

Le bassin versant *El Molino* (91 % de sa superficie) est représentatif des groupements xérophiles à plantes grasses et 90 % de sa superficie présente un taux de recouvrement végétal supérieur à 50 % au niveau du sol. Comme pour les bassins versants précédents, ce taux est susceptible de s'accroître de 20 % au moins pendant la saison des pluies.

5.4. Description des parcelles expérimentales

Elles ont été choisies sur deux types de pentes correspondant à deux morphologies (piémont et haut glacis) et avec différents types de couverts végétaux (arborés, arbustifs et herbacés). Les sites sélectionnés appartiennent à deux bassins versants lithologiquement différents : le bassin Carboneras où les parcelles sont installées sur un versant sédimentaire avec des accumulations calcaires indurées (croûtes) et non indurées (encroûtements) ; le bassin El Viejo où les parcelles sont installées sur un versant rhyolitique. Sur ce versant la profondeur des sols est supérieure à 50 cm alors que les croûtes calcaires limitent l'épaisseur du sol entre 10 et 50 cm sur le bassin Carboneras. Le tableau 5.7 renseigne sur les principales caractéristiques du milieu et des sols de chacune des huit parcelles.

Tableau 5.7. Caractéristiques des parcelles expérimentales.

PARCELLES	Piémont de Versant				Haut Glacis			
	Carboneras		El Viejo		Carboneras		El Viejo	
Identification des parcelles	1	2	3	4	5	6	7	8
Caractéristiques du milieu								
Superficie (m2)	61	62	65	65	59	62	53	68
Pente (%)	15	18	17	18	9	8	11	11
Epaisseur du sol (cm)	25	25	100	50	70	50	100	100
Pierrosité de surface < 2 cm (%)	31	21	40	13	16	55	11	19
> 2 cm (%)	24	29	30	7	3	2	12	26
Couverture totale pierreuse (%)	55	50	70	20	19	57	23	45
Couverture végétale (%)	40	40	28	80	62	34	74	52
Sol nu (%)	5	10	2	0	19	9	3	3
Type de couverture	2	1	2	3	2	1	2	3
Horizon superficiel du sol (0 - 10 cm)								
Refus (2 mm)	49	41	40	49	48	43	59	38
Sable (%)	71	77	59	63	73	61	69	75
Limon (%)	18	12	14	12	14	20	12	6
Argile (%)	11	11	27	25	13	19	19	19
Carbone total (%)	3,8	3,4	3,3	3,6	2,6	1,7	2,0	2,2
CaCO ₃ tot (%)	1	1	0,0	0,0	7,4	14,8	0,0	0,0
pH.	8	8	6,4	5,9	8,2	8,3	6,9	6,6
Stabilité structurale (IS)	0,36	0,34	0,45	0,52	0,38	0,93	1,42	1,42

Remarques : 1- La couverture totale pierreuse est égale à la somme des pierrosités de surface dont les éléments sont de taille supérieure ou inférieure à 2 cm. 2- La somme des pourcentages de recouvrement des sols nus, de la couverture végétale et de la pierrosité est égale à 100 %.

5.5. Conclusion

En relation avec les caractéristiques morpho-lithologiques des paysages du ranch, sept petits bassins versants représentatifs ont été sélectionnés. Selon leur agencement séquentiel et selon la position du *presón*, trois systèmes peuvent être différenciés:

- un **système simple** composé par le versant d'un relief, choisi sur les lithologies les plus représentées dans la zone d'étude (*toba* rhyolitique, et conglomérats basaltiques);
- un **système séquentiel binaire continu**, c'est à dire comprenant un versant auquel est lié un glacis d'épandage (le relief de commandement est constitué d'une roche basaltique, calcaire, ou dacitique);
- un **système séquentiel ternaire continu**, constitué de la succession d'un relief, d'un glacis, et d'une zone d'accumulation alluviale où les reliefs de commandement sélectionnés sont représentés par des massifs rhyolitiques ou calcaires; leur succèdent topographiquement un glacis d'érosion à croûte calcaire indurée, puis une zone de sols alluviaux profonds.

Huit parcelles de ruissellement, aux superficies comprises entre 50 et 70 m², ont également été implantées avec comme objectif particulier d'analyser la relation pluie-ruissellement à une échelle plus fine en quantifiant plus particulièrement les effets de la pente, des différents couverts végétaux et de la pierrosité de surface sur le ruissellement et l'érosion des sols. Les parcelles ont été implantées sur un versant rhyolitique du bassin El Viejo et sur un versant calcaire du bassin Carboneras, sur des pentes supérieures à 15 % (en position de piémont) et sur des pentes voisines de 10 % (en position de haut glacis).

CHAPITRE 6

Observations climatiques

Ce chapitre a pour objectif de présenter les mesures de pluie et d'évaporation faites à l'intérieur du ranch Atotonilco de 1994 à 1997. Les mesures hydrométriques sur les petits barrages ayant réellement commencé en 1996, nous nous intéresserons plus particulièrement aux années 1996 et 1997. Les observations ont continué au cours de l'année 1998 et sont partiellement prises en compte dans cette thèse.

6.1. Les précipitations sur le ranch Atotonilco

6.1.1. Le réseau pluviométrique

Le réseau pluviométrique, mis en place par le CENID RASPA et l'ORSTOM (IRD depuis 1999) dans le ranch Atotonilco, comprend 33 totalisateurs, 5 pluviomètres et 9 pluviographes. Ce réseau (figure 6.1) est réparti sur les 450 km² du ranch suivant deux axes qui correspondent aux deux principales pistes d'accès à l'intérieur de l'exploitation : un axe nord-sud où les totalisateurs sont implantés selon un gradient d'altitude ; un axe est-ouest où les totalisateurs sont répartis avec un espacement de 3 à 5 km. Les pluviographes et les pluviomètres sont installés avec une densité plus élevée sur les 7 bassins versants expérimentaux. Chaque pluviographe est doublé d'un pluviomètre ou d'un totalisateur situé à proximité. Le tableau de l'annexe VI.1.1 précise les coordonnées UTM, l'altitude et les pluies annuelles observées pour les années 1994 à 1998.

Les 33 pluviomètres totalisateurs à bain d'huile sont composés d'un tube d'environ 400 cm² de section, coiffés d'une grille de même dimension pour éviter aux insectes et aux oiseaux de tomber dans le tube. Celui-ci est placé verticalement de telle sorte que son ouverture soit positionnée à un mètre de la surface du sol. Les relevés sont effectués à l'aide d'un mètre gradué avec une précision de lecture de l'ordre de 2 mm (Delhoume 1992), hebdomadaires durant la saison sèche et quotidiens durant la saison des pluies.

Les pluviomètres sont identiques à ceux qui sont utilisées par le Service Météorologique National Mexicain. Ils se composent de deux seaux métalliques : un petit seau avec une capacité de 10 mm de pluie et un grand seau de capacité beaucoup plus grande (environ 100 mm de pluie). La bague du pluviomètre, de 400 cm² de superficie, coiffe un entonnoir qui permet à l'eau de pluie de tomber directement dans le petit récipient. La section du petit seau est de 40 cm². Une règle graduée en millimètres et centimètres permet donc de mesurer directement la hauteur de pluie en millimètres

et dixièmes de millimètre. Quand la hauteur de pluie dépasse 10 millimètres, l'eau recueillie dans le grand seau est reversée dans le petit récipient pour que la hauteur totale puisse être mesurée avec la même précision. A ce principe de mesure, généralement utilisé par le service météorologique national, nous avons substitué, pour le ranch Atotonilco, l'utilisation d'une éprouvette graduée en millilitres en tenant compte des différences observées quant à l'aire des bagues de chaque pluviomètre. Cette superficie varie entre 395 et 405 cm².

Deux types de pluviographes ont été utilisés : trois pluviographes électroniques à augets basculeurs de type OEDIPE et six pluviographes mécaniques à siphon avec tambours à rotation journalière. Les enregistrements pluviographiques sur papier ont été numérisés en utilisant le logiciel PLUVIOM (ORSTOM 1991). Pour les deux centrales associées aux pluviographes de type OEDIPE, le logiciel VISUAL (ORSTOM 1992) a permis d'extraire les données pour les charger sur un ordinateur portable au format PLUVIOM. Pour le pluviographe OEDIPE à mémoire de type EPROM, les cartouches ont été changées mensuellement et les données ont été lues directement à l'aide du logiciel PLUVIOM par l'intermédiaire d'une interface associée à ce type de cartouche.

6.1.2. Les données pluviométriques

Dans le ranch Atotonilco, l'installation du réseau pluviométrique a commencé en 1994 par l'implantation de 25 totalisateurs. Ce chiffre est passé à 32 totalisateurs en 1995 et en 1996 cet équipement a été complété par l'installation de 5 pluviomètres et de 9 pluviographes. Ce réseau a fonctionné avec la même configuration en 1997 et 1998. Les données pluviométriques annuelles présentées dans le tableau de l'annexe VI.1.1 commencent en 1994 et se terminent en 1998.

Les relevés pluviométriques ont été hebdomadaires en 1994 et 1995, journaliers pendant la saison des pluies estivales (juin à septembre) de 1996 à 1998, hebdomadaires après (octobre à mai). Les pluies mensuelles de 1996 à 1998 sont présentées aux annexes VI.1.2 à VI.1.4. Les pluies journalières sont présentées mois par mois pour les saisons pluvieuses 1996 à 1998 (juin à octobre) : annexes VI.1.5 à VI.1.9 pour l'année 1996, annexes VI.1.10 à VI.1.14 pour l'année 1997 et VI.1.15 à VI.1.19 pour l'année 1998.

En se référant à l'analyse statistique de la série des pluies annuelles à la station Atotonilco (Cf. chapitre 4, tableau 4.3), le tableau 6.1 montre que les années 1994, 1995 et 1998 sont sèches avec des périodes de retour supérieures à 10 ans pour l'année 1995, de l'ordre de 8 ans pour l'année 1998, 3 ans pour l'année 1994. Les années 1996 et 1997 sont humides avec des périodes de retour de l'ordre de 4 ans pour l'année 1996, 2 ans (médiane) pour l'année 1997.

Tableau 6.1. Pluies annuelles en mm à la station Atotonilco sur la période 1994 à 1998.

Année	1994	1995	1996	1997	1998
Pluie à la station Atotonilco	382	257	492	433	288

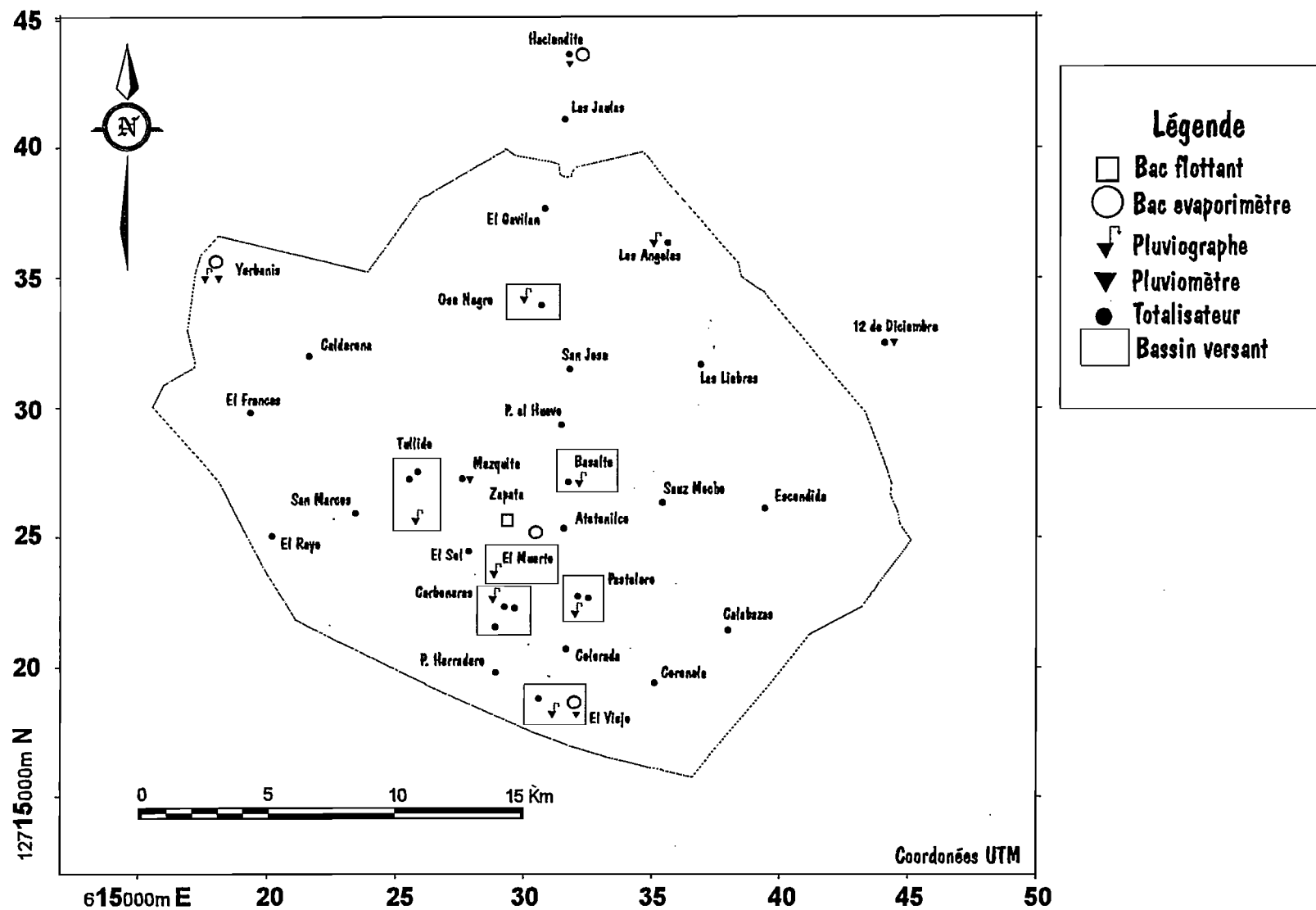


Figure 6.1. Distribution du réseau pluviométrique dans la zone d'étude.

6.1.3. Caractérisation spatiale des pluies

Echelle annuelle

A l'échelle annuelle, dans la zone étudiée comme dans le reste de la région (Descroix et al. 1993; Descroix et al. 1997), il existe un gradient altitudinal des précipitations. Dans le ranch Atotonilco, en année sèche (1994 et 1995) et sur l'axe nord-sud correspondant à une des pistes principales du ranch (figure 6.1), ce gradient prend la valeur de 42,3 mm pour 100 m d'altitude (figure 6.2 A). Pour les années plus humides 1996 et 1997 (figure 6.2 B), sa valeur est de 19,5 mm.

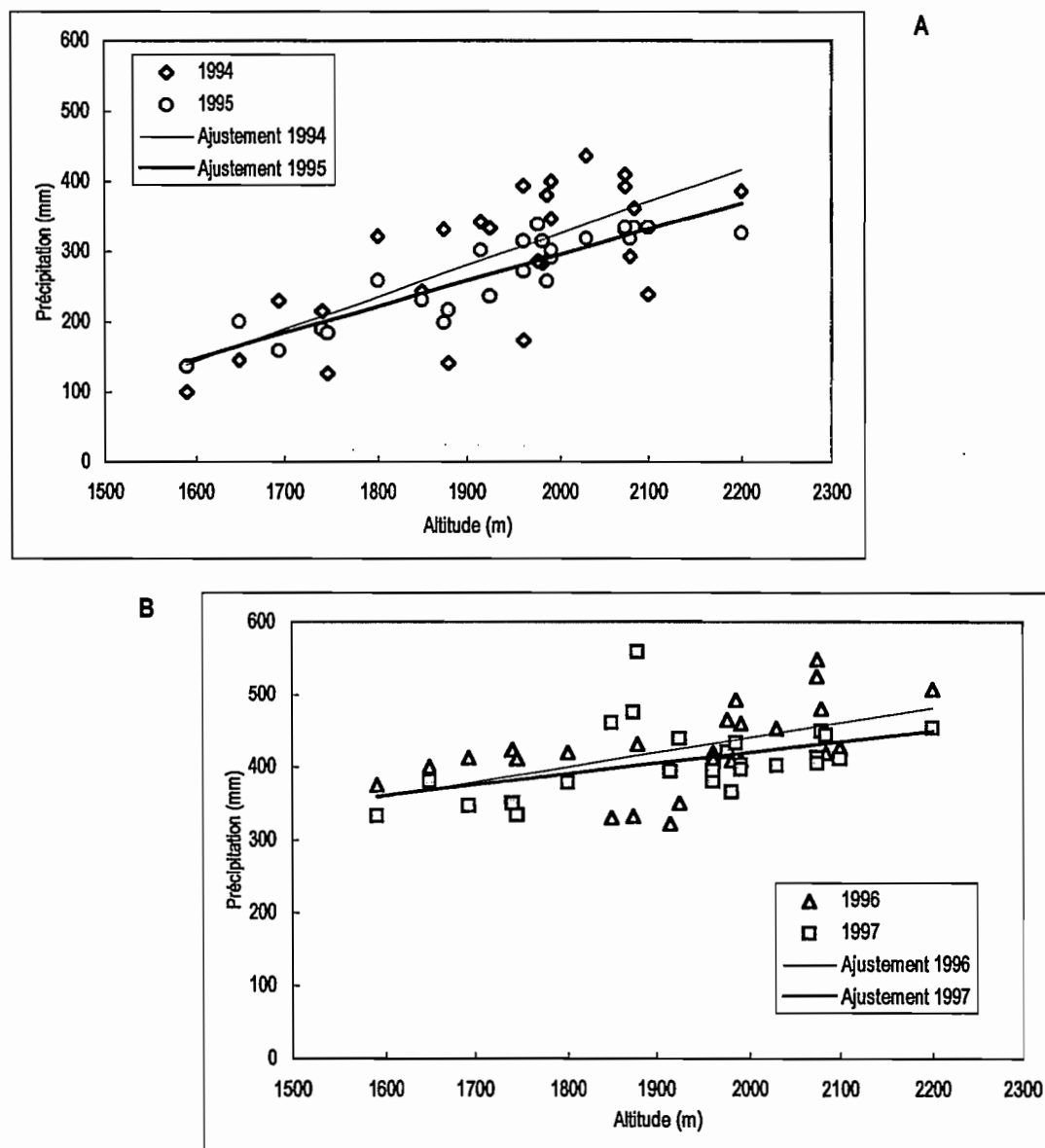


Figure 6.2. Relation Altitude-Hauteur annuelle précipitée dans la zone du ranch.

L'examen de la répartition des pluies mensuelles au cours de l'année (tableau 6.2) et la connaissance du régime du vent (Cf. Ch. 1, paragraphe 2.2) permettent de comprendre les raisons de cette différence de gradient pluviométrique. Les pluies estivales sont en effet la conséquence de flux d'air humide et chaud en provenance du Pacifique, portés par les contre-alizés qui se heurtent à la barrière de la Sierra Madre Occidental avant de pénétrer dans la plaine d'Ocuila puis dans la partie basse de RH36. Par contre, les pluies hivernales sont dues à des flux d'air humide et froid en provenance du nord-est (nord du golfe du Mexique), portés par les alizés qui franchissent plus facilement la Sierra Madre Oriental que ne le font les contre-alizés pour la Sierra Madre Occidental en raison d'une altitude plus faible à l'est qu'à l'ouest : rarement plus de 2000 m dans la Sierra Madre Oriental et plus de 3000 m dans la Sierra Madre Occidental.

Tableau 6.2. Pluies mensuelles à la station Atotonilco sur la période 1994 à 1998.

An	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1994	-	-	-	-	29	101	79	114	7	31	15	6
1995	6	0	0	0	9	17	87	97	41	0	0	0
1996	0	3	0	0	11	42	58	134	148	85	11	0
1997	30	18	14	37	25	53	75	29	76	52	0	24
1998	2	3	0	0	0	15	49	107	47	56	9	0

Ainsi, pour l'année 1996, dont la répartition mensuelle des précipitations (tableau 6.2) montre qu'elles sont exclusivement estivales et abondantes, avec une période de retour de l'ordre de 4 ans, l'effet orographique est faible et le gradient altitudinal également faible.

L'analyse de la répartition spatiale des précipitations pour les années 1994, 1995, 1996 et 1997 (tableau 6.3 et figures 6.3 et 6.4) montre un étalement plus ou moins grand des hauteurs pluviométriques annuelles. Pour les années 1995 et 1997, plus de 80 % des pluies annuelles se concentrent dans un intervalle d'amplitude 100 mm : autour de 300 mm pour l'année 1995, autour de 400 mm pour l'année 1997. Par contre, pour les années 1994 et 1996, 60 % des pluies se concentrent dans le même intervalle.

L'examen des isohyètes pour les années 1995 à 1996 montre que les maximums pluviométriques sont le plus souvent localisés sur les reliefs situés au sud du ranch qui culminent entre les altitudes 2300 à 2450 m (figures 6.3 et 6.4). L'année 1997 fait cependant exception avec un maximum situé au nord du ranch sur les collines basaltiques où l'altitude ne dépasse pas 2000 m (figure 6.4). Les minimums pluviométriques sont généralement localisés au nord du ranch, dans la partie orientale en 1994 et 1995, au centre-ouest en 1996.

Tableau 6.3. Superficies couvertes dans le ranch Atotonilco par les tranches pluviométriques annuelles de 50 mm comprises entre les totaux annuels 100 et 600 mm.

Pluie mm	1994		1995		1996		1997	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
< 150	1,9	0,4						
150 à 200	13,4	2,9						
200 à 250	34,5	7,6	78,7	17,4				
250 à 300	104,8	23,3	125,3	27,7				
300 à 350	132,9	29,5	247,8	54,9	47,5	10,5		
350 à 400	141,1	31,2			88,5	19,6	111,5	24,7
400 à 450	23,2	5,1			159,7	35,4	290,2	64,2
450 à 500					103,7	22,9	38,5	8,5
500 à 550					52,4	11,6	11,6	2,6
550 à 600								
Superficie totale	451,8		451,8		451,8		451,8	

La localisation des maximums pluviométriques au sud du ranch, sur les reliefs, pour les années 1995 et 1996, est à mettre en relation avec la distribution des pluies mensuelles (tableau 6.2) qui montre pour ces deux années une répartition exclusivement estivale des pluies. Comme nous l'avons déjà expliqué précédemment, les pluies estivales sont générées par l'arrivée de masses d'air humides provenant du Pacifique qui franchissent la Sierra Madre Occidental avec d'autant plus de difficulté que l'épaisseur des masses nuageuses est faible et le FIT peu actif. Ces masses d'air s'assèchent en pénétrant la plain de Cuencame où les pluies sont plus rares et moins abondantes.

Pour l'année 1997, plus du quart des précipitations sont hivernales (tableau 6.2) et les précipitations estivales, normales en juin, juillet et septembre, sont très déficitaires en août. Le déplacement des maximums pluviométriques annuels vers le Nord du ranch semble être la conséquence des fortes pluies hivernales. Celles-ci sont dues en effet à l'arrivée de masses d'air humide et froid poussées par les alizés de direction Nord-Est. Ces masses d'air sont accompagnées de formations nuageuses très étendues mais peu épaisses qui provoquent des pluies de très longue durée et de faible intensité.

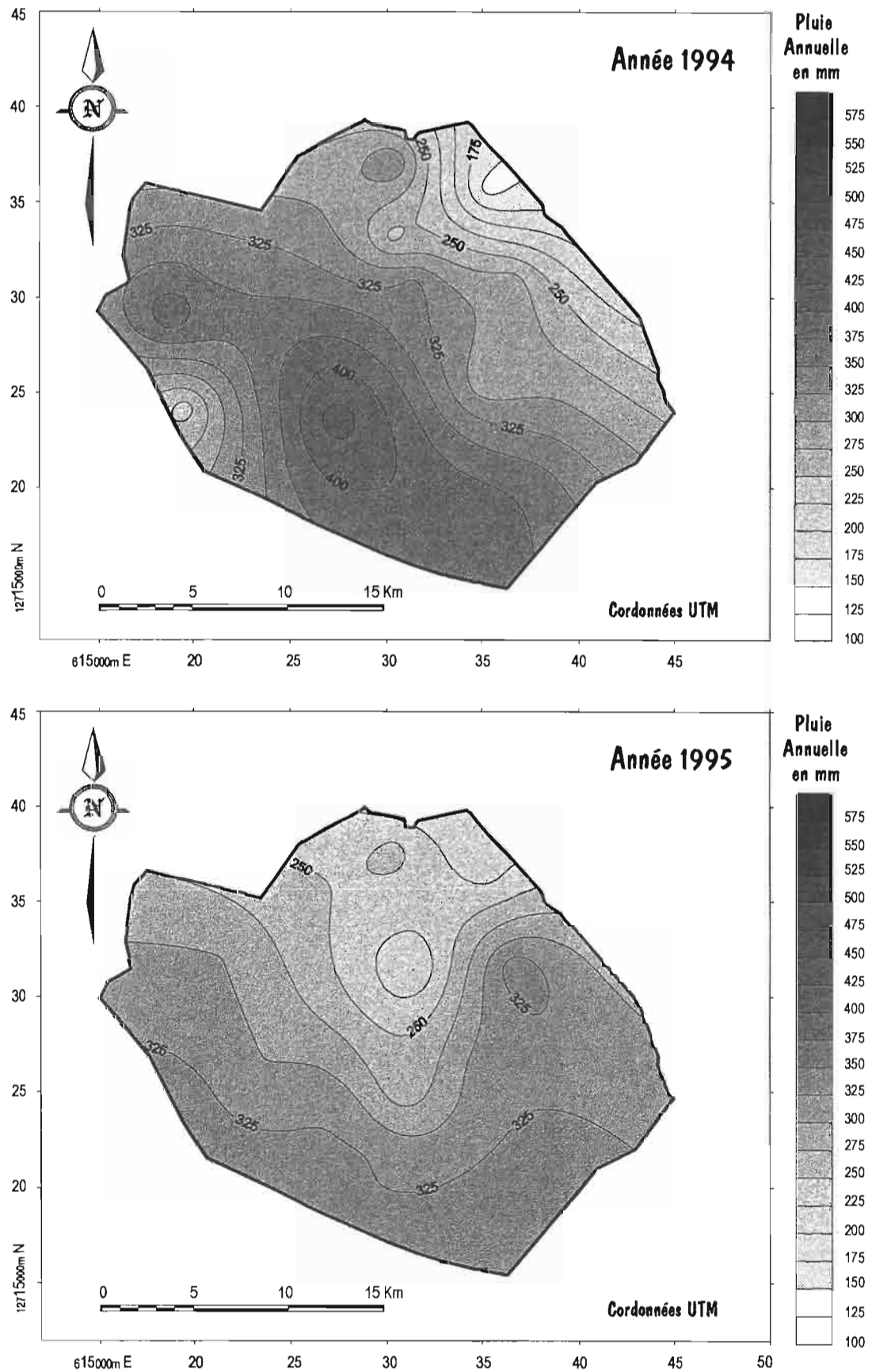


Figure 6.3. Répartition spatiale de la pluie à l'intérieur du ranch pour les années 1994 et 1995.

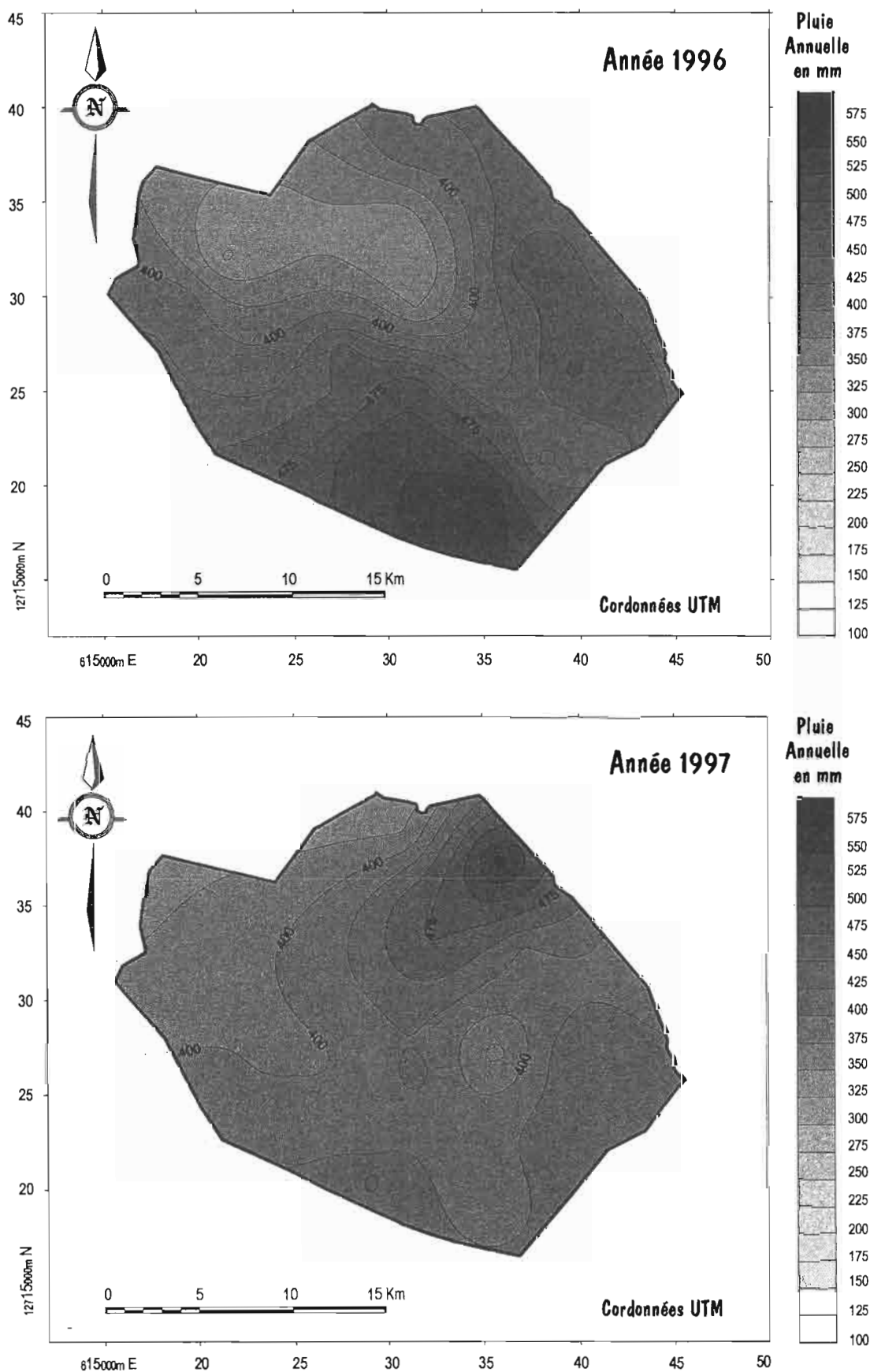


Figure 6.4. Répartition spatiale de la pluie à l'intérieur du ranch pour les années 1996 et 1997.

Echelle journalière

Une analyse des précipitations au niveau des événements montre différents types de répartition spatiale. Les figures 6.5A, 6.5B et 6.5C présentent la répartition des pluies journalières observées au début, au milieu et à la fin de la saison des pluies de l'année 1996 : 01 juin 1996 pour la figure 6.5A, 18 septembre 1996 pour la figure 6.5B et 3 octobre 1996 pour la figure 6.5C. Ces trois événements correspondent à des extensions spatiales de plus en plus grandes (tableau 6.4) telles qu'elles se présentent généralement au cours d'une saison pluvieuse. En début saison des pluies, l'événement pluviométrique du 01 juin 1996, centré sur les reliefs au sud du ranch, est caractérisé par une faible superficie au sol (17 km²) et une hauteur maximale de 20 mm. Cette faible extension spatiale est en liaison avec celle des cellules convectives. Pour l'événement survenu le 18 septembre 1996 (figure 6.5B), centré également au sud du ranch, sa superficie au sol pour une pluie supérieure à 5 mm est de 160 km² et sa hauteur maximale est de 40 mm. Il est caractéristique des événements pluvieux qui se développe surtout, mais pas exclusivement, en pleine saison des pluies. La pluie du 3 octobre 1996 est généralisée à l'ensemble du ranch avec un maximum de 70 mm centré au nord du ranch contrairement aux deux autres événements et un minimum de 10 mm au sud du ranch (figure 6.5C). Sa répartition spatiale est plutôt caractéristique d'une pluie hivernale.

Tableau 6.4. Superficies occupées dans le ranch Atotonilco par les trois événements du 01/06, 18/09 et 03/10/1996, découpés en classes de hauteur pluviométrique croissante.

Classe	Superficies en km ²		
mm	01-06-96	18-09-96	03-10-96
>70			1,13
65 - 70			5,79
60 - 65			15,25
55 - 60			23,43
50 - 55			31,80
45 - 50			51,06
40 - 45		0,21	60,17
35 - 40		0,73	66,12
30 - 35		2,71	56,22
25 - 30		14,67	53,83
20 - 25	0,05	16,87	36,72
15 - 20	0,94	19,38	46,56
10 - 15	3,24	32,71	1,64
05 - 10	12,63	75,26	

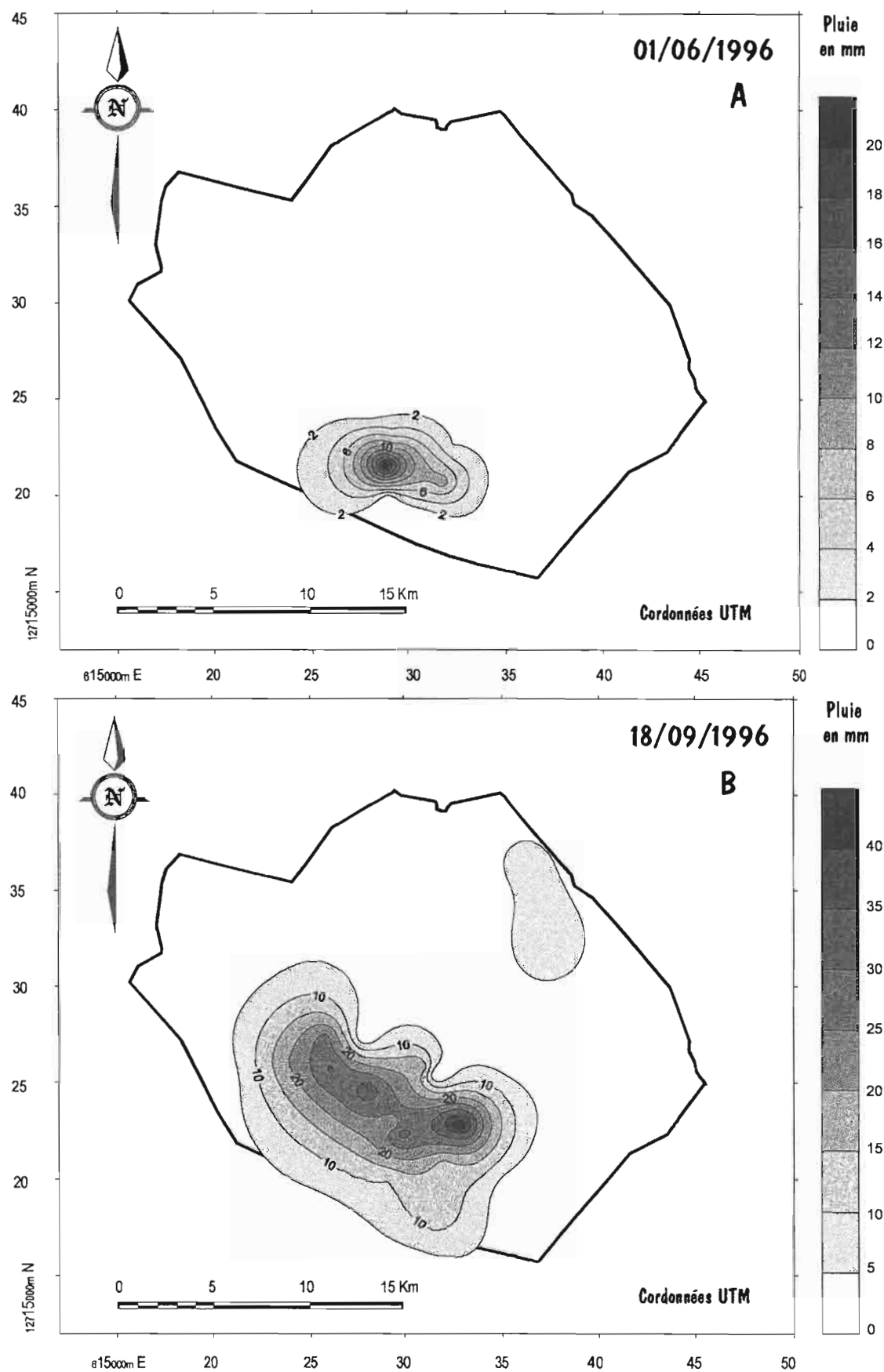


Figure 6.5. Isohyètes des pluies journalières du 01/06/96 (A) et 18/09/96 (B).

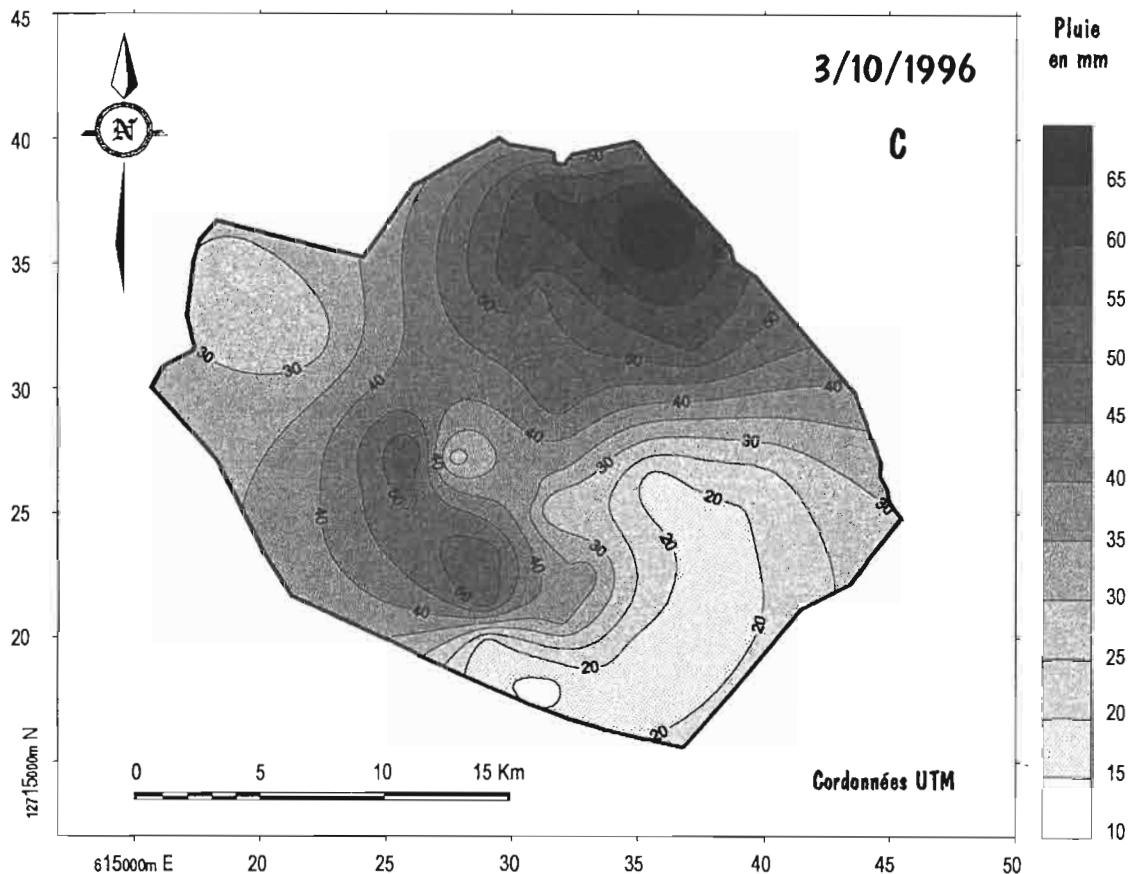


Figure 6.5. Isohyètes des pluies journalières du 03/10/1996 (C).

6.1.4. Caractéristiques pluviographiques

Les intensités de pluies ont été dépouillées au pas de temps de 10 minutes. Il ne semble pas y avoir de différence nette entre les hyétogrammes de début de saison des pluies (juin et juillet) et ceux de mi-saison (août et septembre). En octobre, les pluies sont de plus faible intensité et de plus longue durée. Elles présentent des intensités qui ne dépassent pas 5 mm/h et peuvent avoir une durée atteignant 4 à 5 heures (pluie du 3/10/96). Ces caractéristiques, spécifiques aux averses du mois d'octobre, peuvent être expliquées par des températures plus faibles que celles des mois précédents (environ 5 degrés en dessous des valeurs estivales). Cette relative faiblesse des températures n'est pas très propice à la formation de cellules convectives très actives qui sont en général associées à des pluies de forte intensité.

Il existe une relation entre les intensités maximales aux pas de temps supérieurs ou égaux à 10 minutes et les hauteurs totales des averses. La figure 6.6 montre ce type de relation à la station pluviographique de Carboneras pour l'année 1996 entre les intensités maximales (I_{max} , en mm/h) au pas temps de 10 minutes et les hauteurs totales des averses (H , en mm). La relation est linéaire, de la forme : $I_{max} = 2,1 \times H$.

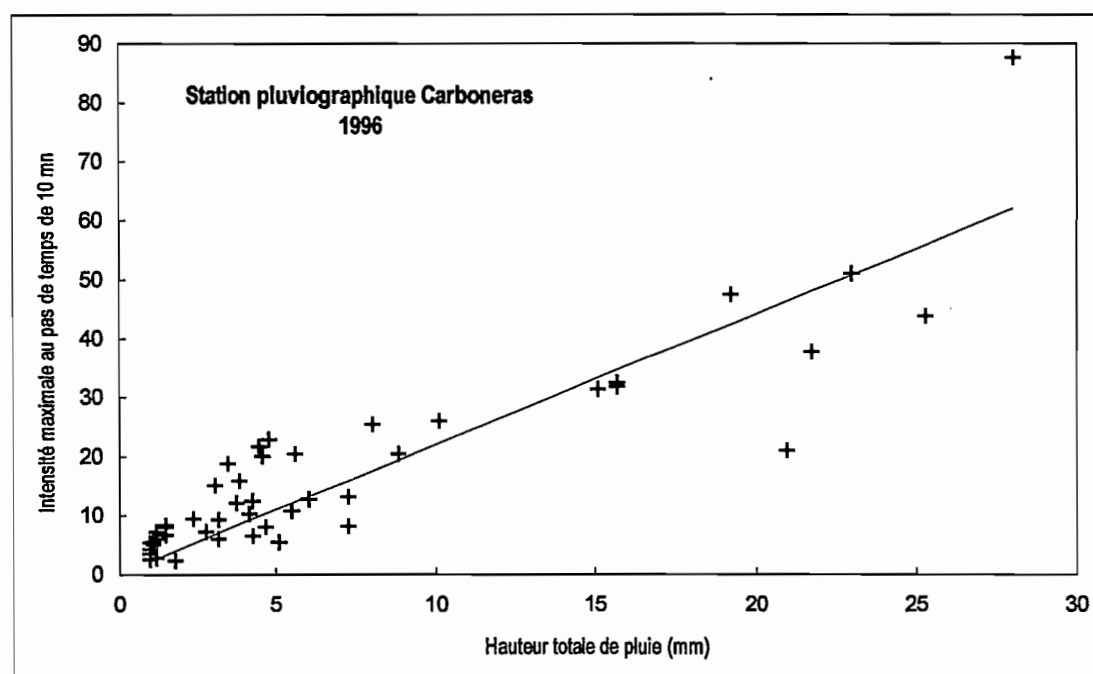
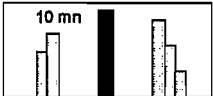
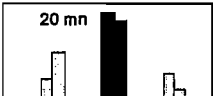
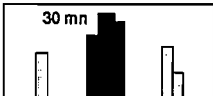


Figure 6.6. Intensités maximales au pas de temps de 10 minutes en fonction de la hauteur totale de l'averse à la station pluviographique Carboneras.

Sur le tableau 6.5, relatif à la station pluviographique de Carboneras, pour l'année 1996, nous avons séparé les averses en trois parties : une première partie qui précède l'intensité maximale, une seconde partie formée de l'intensité maximale en 10, 20 et 30 minutes et une troisième partie qui suit l'intensité maximale et termine l'averse. Le tableau comprend donc trois groupes de trois colonnes, chaque groupe étant relatif au pas de temps de l'intensité maximale considérée. Les valeurs reportées dans la colonne centrale de chaque groupe correspondent aux pourcentages de la hauteur totale de l'averse sur les pas de temps de 10, 20 et 30 minutes pour quatre classes d'intensités maximales : inférieures à 10 mm/h, comprises entre 10 et 20 mm/h, entre 20 et 40 mm/h et supérieures à 40 mm/h. Les autres colonnes placées de part et d'autre de l'intensité maximale correspondent aux pourcentages des hauteurs totales des averses avant et après l'intensité maximale. Pour chaque classe d'intensité, les valeurs de la première ligne correspondent aux pourcentages moyens observés, celles de la seconde ligne aux pourcentages maximaux, celles de la troisième ligne aux pourcentages minimaux. Le nombre d'événements par classe d'intensité maximale est placé dans la troisième colonne du tableau.

Tableau 6.5. Décomposition en trois parties des hyétoigrammes observés à la station pluviographique de Carboneras pour l'année 1996.

INTENSITE MAXIMALE	VAR	NE									
			10 mn	20 mn	30 mn	10 mn	20 mn	30 mn	10 mn	20 mn	30 mn
< 10 mm/h	MOY	27	15,0	56,6	28,4	15,0	69,0	15,9	8,4	75,7	15,9
	MAX		57,6	100,0	67,8	57,6	100,0	58,5	43,1	100,0	58,5
	MIN		0,0	16,1	0,0	0,0	25,1	0,0	0,0	34,4	0,0
10 à 20 mm/h	MOY	9	13,5	53,8	32,6	13,5	70,7	15,7	9,4	74,9	15,7
	MAX		38,5	89,0	53,6	38,5	100,0	36,4	34,1	100,0	36,4
	MIN		0,0	32,2	11,0	0,0	44,8	0,0	0,0	50,0	0,0
20 à 30 mm/h	MOY	11	10,0	55,2	34,7	10,0	65,7	24,3	7,1	68,6	24,3
	MAX		36,0	82,9	65,6	36,0	96,6	53,4	30,2	100,0	53,4
	MIN		0,0	34,4	3,8	0,0	43,7	0,0	0,0	46,6	0,0
> 40 mm/h	MOY	3	25,1	41,4	33,5	25,1	58,4	16,5	7,5	76,0	16,5
	MAX		39,8	53,2	44,6	39,8	72,9	22,0	20,3	94,5	22,0
	MIN		13,9	29,5	25,1	13,9	38,2	5,5	0,0	57,7	5,5

NE : Nombre d'événements		Pourcentage du total de la pluie tombée avant l'intensité maximale
VAR : Variable		Pourcentage du total de la pluie tombée pendant l'intensité maximale en 10 mn
MOY : Moyenne		Pourcentage du total de la pluie tombée pendant l'intensité maximale en 20 mn
MAX : Valeur maximale		Pourcentage du total de la pluie tombée pendant l'intensité maximale en 30 mn
MIN : Valeur minimale		Pourcentage du total de la pluie tombée après l'intensité maximale

L'interprétation du tableau 6.5 permet de tirer des conclusions intéressantes quant à la répartition des hauteurs de pluie au sein des hyétoigrammes. En premier lieu, on constate que plus de 50 % du total de la pluie tombe pendant l'intensité maximale en 10 minutes, sauf pour les averses de forte intensité (> 40 mm/h) et de longue durée (> 60 mn); plus de 65 % du total de la pluie tombe pendant l'intensité maximale en 20 minutes et plus de 70 % du total de la pluie tombe pendant l'intensité maximale en 30 minutes.

En second lieu, l'examen des colonnes placées de chaque côté de l'intensité maximale permet d'évaluer la position de l'intensité maximale au sein des hyétoigrammes. Un pourcentage équilibré de part et d'autre de l'intensité maximale indique un centrage de l'intensité maximale au cœur de l'averse. Un pourcentage plus faible avant l'intensité maximale indique que celle-ci est placée en début d'averse. A l'inverse, un pourcentage plus faible après l'intensité maximale indique qu'elle est placée en fin d'averse.

Les intensités maximales inférieures à 40 mm/h, calculées sur un pas de temps de 10 minutes, se situent nettement en début d'averse, le pourcentage du total de la pluie tombée avant le maximum d'intensité (10 à 15 %) étant nettement inférieur au pourcentage du total de la pluie tombée après le maximum (28 à 35 %). Cette structure moyenne de l'averse, marquée par un

décalage du maximum en début d'averse, se retrouve pour les intensités maximales calculées sur le pas de temps de 30 minutes. Soulignons que le minimum des pourcentages avant ou après le maximum est très souvent égal à zéro (Cf. tableau 6.5), ce qui signifie que le maximum de l'intensité peut être placé soit au début, soit à la fin de l'averse.

Pour une intensité maximale supérieure à 40 mm/h, malgré le petit nombre d'événements observés (3), on peut remarquer un meilleur centrage de l'intensité maximale au sein du hyétogramme, principalement pour les averses de longue durée, plus de 60 mn : averses du 31/08/1996 et 4/09/1996 sur le tableau 6.5.

Sur le tableau 6.6 nous avons créé quatre classes de durée des averses : celles de durée inférieure à 30 minutes, les averses dont la durée est comprise entre 30 et 60 minutes, entre 60 et 120 minutes et les averses de durée supérieure à 2 heures. Le début et la fin de l'averse sont définis en considérant un seuil d'intensité minimale de 1 mm/h. L'averse est une pluie dont la hauteur est supérieure ou égale à 1 mm. Pour chaque classe de durée, nous avons séparé et dénombré les événements dont l'intensité maximale est placée au début, au milieu ou à la fin de l'averse.

Tableau 6.6. Nombre d'averses par classe de durée, en fonction de la position de l'intensité maximale à la station Carboneras pour l'année 1996.

Durée de l'averse mn	Nombre d'événements avec l'intensité maximale		
	En début d'averse	En milieu d'averse	En fin d'averse
< 30	12	4	1
30 - 60	7	4	3
60 - 120	6	3	
>120	4	4	2

L'analyse du tableau 6.6 montre que plus de 60% des averses ont une durée inférieure à une heure et 20 % des averses ont une durée supérieure à 2 heures. De plus, 70 % des événements ont l'intensité maximale placée en début d'averse contre 16 % seulement en fin d'averse. Ce résultat est conforme à ceux qui ont été obtenus par Nouvelot (1997) dans la RH36 : " Dans tous les cas, presque 2/3 des averses ont leur maximum d'intensité dans le premier quart de leur durée ".

6.2. L'évaporation

6.2.1. Mesures effectuées dans le ranch

Appareils de mesure

Dans le ranch Atotonilco, deux types d'appareils ont été utilisés pour mener à bien les mesures d'évaporation effectuées durant les campagnes 1996 et 1997 : des évaporimètres au sol de type classe A et un évaporimètre immergé dans une retenue permanente alimentée par une source (*presón Zapata*).

L'évaporimètre Classe A (*Weather Bureau* nord-américain) est un bac d'évaporation de forme circulaire avec un diamètre de 121,9 cm (4 pieds) et une profondeur de 25,4 cm (10 pouces). Pour réaliser une mesure correcte de l'évaporation, le niveau d'eau doit fluctuer entre 5,1 et 7,6 cm (2 à 3 pouces) du bord supérieur du bac. Le bac repose sur un bâti en bois construit de telle sorte qu'il puisse exister une circulation d'air à la base du bac, lui-même devant se situer à 15,2 cm du sol (6 pouces). La mesure du niveau d'eau s'effectue à partir d'une vis micrométrique au 1/100^{ème} de millimètre. Elle est fixée sur un petit cylindre de 10,16 cm de diamètre (4 pouces), dont la partie inférieure est en communication avec l'eau du bac par un petit orifice.

Pour la mesure de l'évaporation sur un plan d'eau, nous avons utilisé un bac flottant métallique de forme carrée, de 1 m² de surface évaporante et 30 cm de profondeur. Le bac lui-même était supporté par un bâti métallique de 1,5 x 1,5 x 0,4 m, construit avec du tubage carré de 3,4 x 3,4 cm. Sur le bâti, étaient fixées huit lames métalliques réglables destinées à supporter huit flotteurs de capacité 20 litres, dont le remplissage partiel permettait d'ajuster la hauteur de flottaison du bac. L'accès au bac se faisait par une passerelle flottante de 12 mètres de long. Une plaque métallique soudée dans un des angles du bac permettait d'isoler partiellement la surface de mesure en laissant au fond du bac un espace 0,5 centimètre pour assurer une libre circulation de l'eau entre les deux compartiments. Une baguette métallique crochétée, fixée à 10 cm du bord supérieur du bac, remplaçait la vis micrométrique. Le volume évaporé se mesurait par remplissage du bac jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne l'extrémité de la baguette. L'utilisation d'une bouteille de un litre permettait d'obtenir une précision de 1 mm sur la mesure de l'évaporation journalière, la surface évaporante étant égale à 1 m², un litre d'eau ajouté correspondait en effet à un millimètre d'évaporation.

Un réseau de cinq évaporimètres classe A et d'un bac flottant (figure 6.1) a été mis en place en tenant compte de l'altitude et des possibilités d'accès. Un pluviomètre placé sur chacun des sites permettait de mesurer la hauteur de pluie journalière tombée sur le bac.

Calcul de l'évaporation

Les mesures étaient effectuées quotidiennement à huit heures du matin. Le bilan d'eau des bacs à évaporation est donc réalisé au pas de temps journalier.

Pour le bac classe A, on calcule la différence entre les mesures de hauteur d'eau entre deux jours successifs et on ajoute à cette valeur la hauteur pluviométrique mesurée au pluviomètre placée à proximité. La valeur ainsi calculée est attribuée au jour qui précède la mesure.

Pour le bac flottant on ajoute le nombre de litres versés à la hauteur pluviométrique mesurée.

L'annexe VI.2.1 présente, pour l'année 1996, les valeurs journalières de l'évaporation au bac classe A et au bac flottant de la station Zapata.

Tableau 6.7. Evaporations journalières moyennes mensuelles dans le ranch Atotonilco.

Station	Jaulas		Yerbanis		Zapata (bac flottant)		Zapata (bac A)		El Viejo	
Altitude (m)	1740		1900		1950		1960		2150	
Mois \ année	1996	1997	1996	1997	1996	1997	1996	1997	1996	1997
Janvier	6,3	4,02	5,3	4,66	5,3	5	5,8	5,2	6,0	4,67
Février	5,9	5,43	6,3	6,66	5,4	6,8	6,3	7	6,5	8,84
Mars	7,8	5,45	8,3	6,43	7,3	6,3	8,0	5,7	9,9	6,44
Avril	8,8	7,05	9,9	7,38	7,9	6,6	8,5	8,2	11,1	9,44
Mai	10,0	8,13	11,3	7,48	9,1	6,7	10,8	8,3	11,4	7,58
Juin	8,2	8,02	8,3	8,03	8,3	6,8	8,2	8,4	9,2	7,82
Juillet	7,5	6,25	7,4	7,25	8,4	9,6	8,5	7,3	8,0	7,4
Août	6,2	7,2	5,7	6,9	7,2	10,1	6,4	7,7	6,8	6,73
Septembre	3,6	5,8	4,5	6,15	5,1	8,7	5,2	6,7	4,6	5,74
Octobre	3,6	4,85	4,8	5,48	6,4	5,87	6,5	6,04	5,4	5,12
Novembre	3,6	5,67	5,2	4,67	5,6	7,71	5,7	7,04	5,2	4,83
Décembre	3,0	3,77	3,5	4,7	4,1	9,11	4,2	7,87	3,0	5,28
Moyenne annuelle	6,2	6,0	6,7	6,3	6,7	7,4	7,0	7,1	7,3	6,7
Total annuel (mm)	2266	2185	2449	2312	2436	2723	2558	2606	2649	2437

Evaporation en mm/jour

6.2.2. Variations de l'évaporation avec l'altitude

A l'échelle annuelle, on observe avec les évaporimètres classe A une augmentation de l'évaporation avec l'altitude. Cet accroissement est de 50 mm pour 100 m pour l'année 1997 au dessus de l'altitude 1900 m entre les stations de Zapata et El Viejo (figure 6.7), dans la zone montagneuse du ranch. Il est de l'ordre de 1,5 mm par mètre pour l'année 1997 au-dessous de l'altitude 1900 m. Pour l'année 1996, les valeurs observées à Yerbanis et El Viejo sont nettement plus faibles que celles de l'année 1997, de telle sorte qu'il est difficile de déterminer des gradients altitudinaux d'évaporation annuelle.

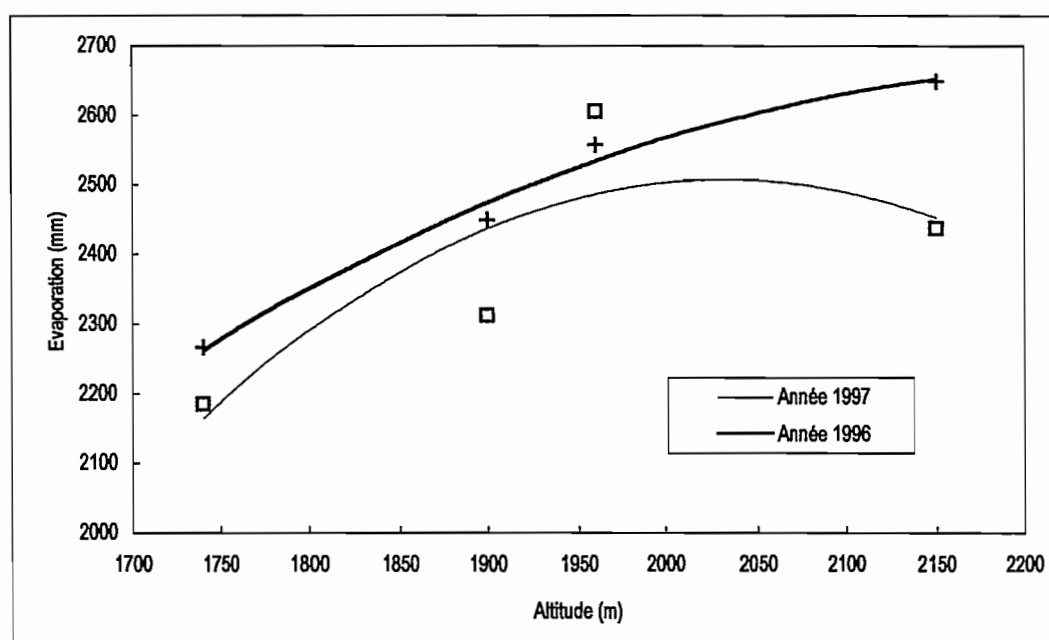


Figure 6.7. Relation altitudinale de l'évaporation en bacs classe A

A l'échelle mensuelle, les variations de l'évaporation avec l'altitude sont plus complexes. Néanmoins, en considérant la moyenne journalière de l'évaporation des mois les plus froids (novembre, décembre et janvier) et des mois les plus chauds (février à mai), on note que pour la période froide la valeur maximale (5,5 mm/jour) se situe autour des 2000 mètres, alors que pour la période chaude la croissance est continue et le maximum (9,7 mm/jour) coïncide avec l'altitude la plus élevée (figure 6.8). Les valeurs moyennes de la période humide (juin à octobre) présentent, comme en période froide, un maximum d'évaporation (7,1 mm/jour) vers 2000 d'altitude.

Les gradients altitudinaux de l'évaporation journalière sont égaux à :

- 0,4 mm pour 100 m en période chaude et sèche (février à mai),
- 0,14 mm pour 100 m en période pluvieuse estivale (juin à octobre),
- 0,1 mm pour 100 m en période froide (novembre à janvier).

L'accroissement général de l'évaporation avec l'altitude s'explique principalement par l'augmentation de la vitesse du vent en période sèche (février à mai). En période estivale humide et en période froide, l'évaporation au dessus de 2000 m (El Viejo) est très légèrement supérieure à celle qu'on observe à Las Jaulas à l'altitude 1740 m. Entre les deux bacs évaporatoires, la différence d'altitude est de 410 m et la différence de température moyenne de 2,4 °C. La diminution de la température avec l'altitude ne suffit donc pas à provoquer une diminution de l'évaporation.

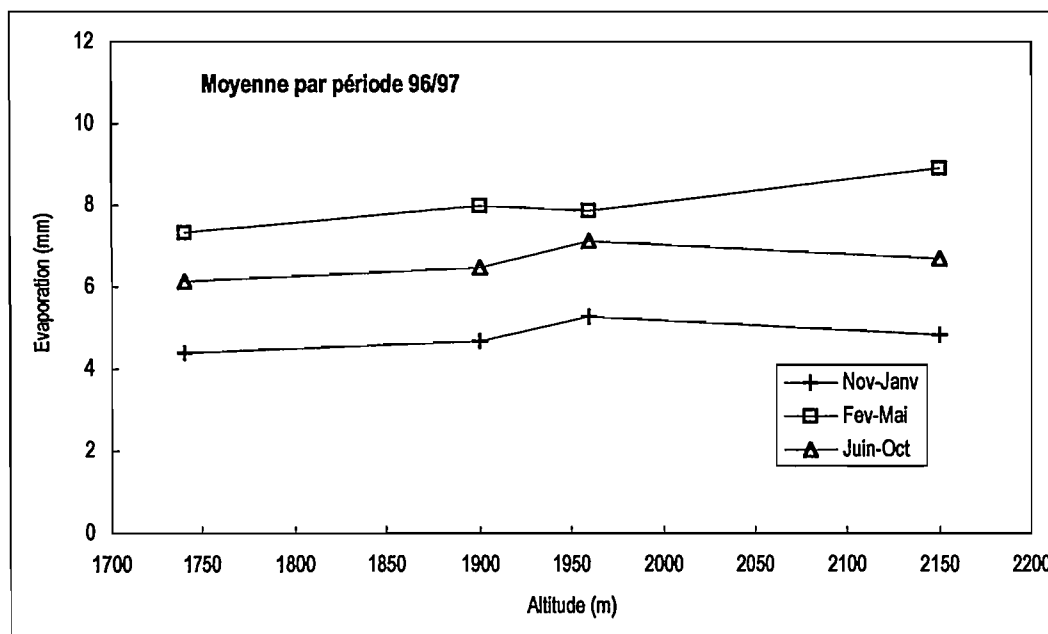


Figure 6.8. Variations de l'évaporation saisonnière moyenne avec l'altitude.

6.2.3. Variations saisonnières de l'évaporation

Les moyennes mensuelles de l'évaporation journalière pour les années 1996 et 1997 sont consignées à l'annexe VI.2.2 pour les stations Las Jaulas, Yerbanis, Zapata et El Viejo. Leurs valeurs sont reportées sur la figure 6.9.A pour l'année 1996 et 6.9.B pour l'année 1997.

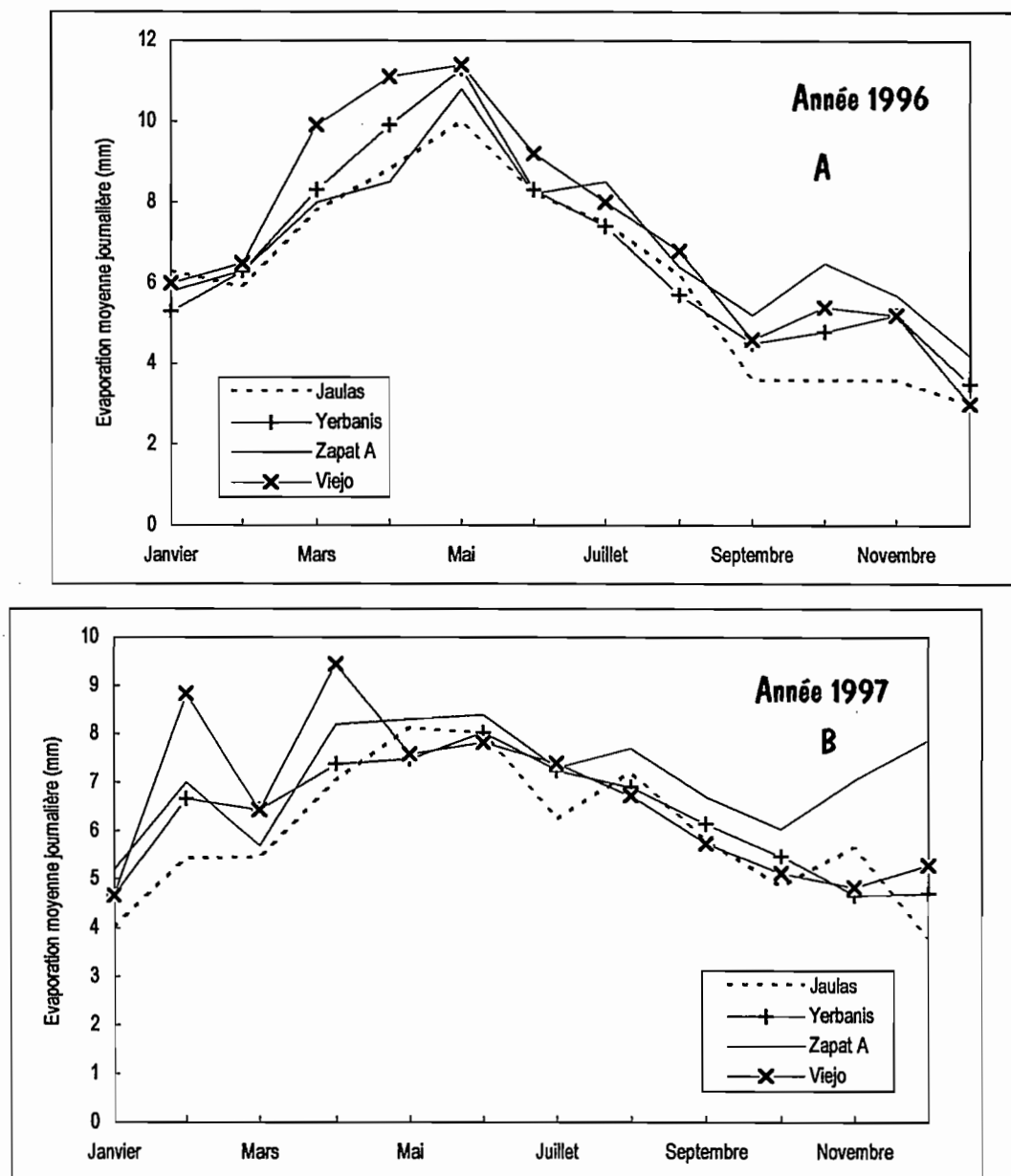


Figure 6.9. Moyennes mensuelles de l'évaporation journalière au bac classe A des quatre stations du ranch Atotonilco (A 1996 et B 1997).

Du point de vue temporel, l'analyse des valeurs moyennes mensuelles des deux années d'observation montre que les plus fortes évaporations sont mesurées durant les mois d'avril et mai, pendant la saison chaude et sèche (Cf. chapitre 4, figure 4.2), avec des valeurs journalières maximales qui oscillent entre 7,5 et 9,5 mm pour des températures moyennes de 21,7 °C en mai. Les valeurs minimales de 3,2 à 6,0 mm/jour sont mesurées durant les mois de décembre et janvier, avec

des températures moyennes de l'ordre de 13 °C. En général, l'évaporation décroît régulièrement de juin à décembre, mais une petite remontée peut être observée en octobre ou novembre. Elle coïncide avec une légère remontée des températures journalières (figure 4.3).

En altitude (station El Viejo), les mois de février, mars et avril peuvent être marqués par un accroissement important de l'évaporation dû à la violence des vents de direction nord-sud.

6.2.4. Relations entre mesures au bac flottant et mesures au bac classe A

Les relations entre mesures au bac flottant et mesures au bac classe A ont été déterminées à partir des observations effectuées à la station Zapata, située à une altitude de 1960 m (altitude du plan d'eau du *presón*). Les valeurs de l'évaporation au bac flottant ayant un écart de plus de 30% par rapport à celles mesurées sur le bac classe A ont été éliminées. Les mesures effectuées sur le bac flottant sont en effet nettement moins précises que celles qui sont réalisées sur le bac classe A, en raison de l'instabilité du bac flottant pendant la mesure (précision maximale théorique de l'ordre du mm pour le bac flottant et de l'ordre de 1/100 ème de mm pour le bac classe A).

A l'échelle mensuelle (figure 6.10), au-dessus d'une valeur journalière de 4 mm/jour les relations entre les mesures aux deux types de bacs sont les suivantes :

- sur la période de janvier à mai $Y = 0,86 X + 0,55$ avec $R^2 = 0,87$;
 - sur la période de juin à décembre $Y = 0,96 X + 0,2$ avec $R^2 = 0,81$;
- X étant l'évaporation sur le bac classe A et Y l'évaporation sur le bac flottant.

De janvier à mai, l'évaporation du bac classe A est nettement plus forte que celle du bac flottant, alors que les deux évaporations sont quasiment identiques de juin à décembre, sauf pour les premiers mois froids, novembre et décembre, pour lesquels l'inertie thermique de la retenue explique les valeurs plus fortes observées au bac flottant. Cette inertie thermique joue d'ailleurs en sens inverse pendant la saison chaude.

Au-dessous de la valeur 4 mm/jour, l'évaporation au bac flottant peut être considérée comme identique à l'évaporation au bac classe A soit :

$$\text{pour } X < 4 \text{ mm/jour, } Y = X.$$

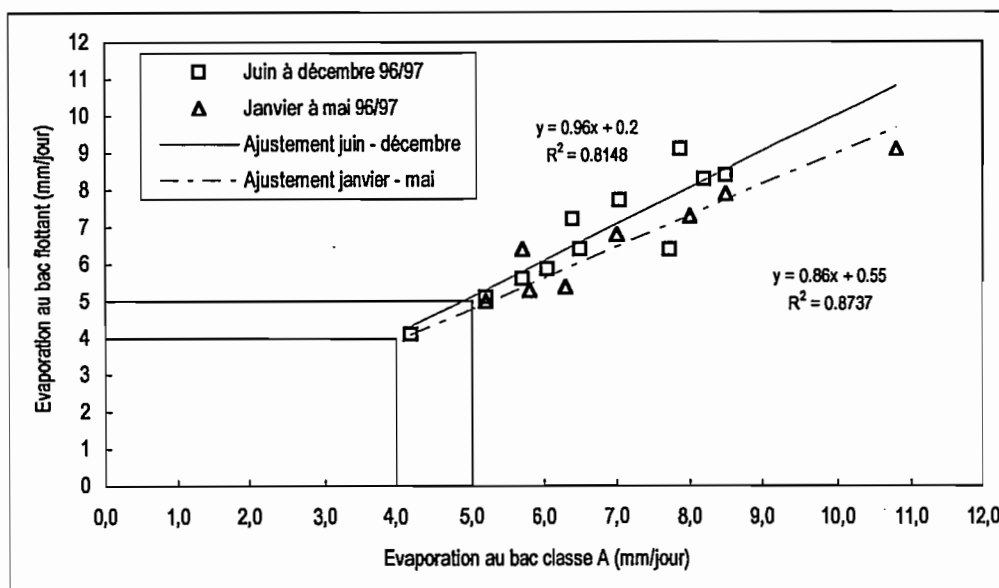


Figure 6.10. Relations entre l'évaporation au Bac classe A et l'évaporation au Bac flottant pour la période d'observation.

6.3. Conclusion

A l'échelle annuelle, les hauteurs pluviométriques croissent avec l'altitude à raison de 40 mm tous les 100 m en année sèche (1994 et 1995) et de 20 mm tous les 100 m en année normale ou légèrement excédentaire (1996 et 1997). Cette variation du gradient altitudinal des pluies annuelles est due probablement à une activité plus ou moins intense du FIT pendant la période estivale et à l'occurrence de pluies hivernales (1997). Plus les pluies estivales et hivernales sont fortes, plus le gradient pluviométrique annuel altitudinal est faible. De l'épaisseur de la masse nuageuse estivale, poussée par les vents de sud-ouest (contre-alizés), dépend l'importance des masses d'air humide qui franchissent la barrière topographique de la Sierra Madre Occidental. Au contraire, la faible épaisseur des nuages en hiver, portés par les vents de nord-est (alizés), ne permet pas la chute des pluies sur les reliefs du ranch, contrebalançant ainsi l'excédent pluviométrique observé sur les reliefs en été.

A l'échelle journalière, l'extension spatiale des averses varie nettement au cours de la saison des pluies estivales. En début de saison, les averses sont souvent orageuses et de faible extension (par exemple la pluie du 1 juin 1996). Au cours de cette même saison, les averses prennent de la puissance et de l'extension (pluie du 18 septembre 1996). En fin de saison, elles ont tendance à se généraliser à l'ensemble du ranch (pluie du 3 octobre 1996).

L'analyse des hyétogrammes a montré que plus de 50 % du total de la pluie tombe pendant l'intensité maximale en 10 mn, plus de 65 % pendant l'intensité maximale en 20 mn et plus de 70 % pendant l'intensité maximale en 30 mn. De plus, 70 % des averses ont l'intensité maximale placée en

début d'averse, dans le premier quart de leur durée, contre 16 % seulement en fin d'averse. Un nombre non négligeable d'averses ont donc leurs intensités maximales placées en fin d'averse et nous essaierons de tenir compte de cette caractéristique particulière à certaines averses pour expliquer les ruissellements qui leur sont associés.

Référence faite à l'année 1996, les données d'évaporation montrent une relation croissante de l'évaporation annuelle avec l'altitude :

- à l'altitude moyenne du ranch, environ 1970 m, l'évaporation annuelle est de 2540 mm,
- à l'altitude de la station El Viejo (2150 m) elle est de 2640 mm.

En ce qui concerne l'année 1997, l'occurrence de pluies en saison sèche et chaude provoque une baisse généralisée de l'évaporation, sauf à la station Zapata. A l'échelle saisonnière, le gradient altitudinal de l'évaporation moyenne journalière est égal à 0,4 mm pour 100 m sur la période chaude et sèche (février à mai). Il est beaucoup plus faible en hiver et en été, périodes pour lesquelles il varie de 0,1 à 0,14 mm pour 100 m. L'accroissement général de l'évaporation avec l'altitude s'explique principalement par l'augmentation de la vitesse du vent en saison sèche et chaude, malgré une diminution des températures (0,6 °C pour 100 m).

A l'échelle mensuelle, l'analyse des mesures au bac classe A installé près du *presón* Zapata et des mesures au bac flottant installé sur le même *presón*, montre l'existence de deux relations :

- sur la période de janvier à mai $Y = 0,86 X + 0,55$;
 - sur la période de juin à décembre $Y = 0,96 X + 0,2$;
- X étant l'évaporation au bac classe A et Y l'évaporation au bac flottant.

Ces relations seront utilisées au chapitre 11 pour calculer l'évaporation des plans d'eau des *presones*.

CHAPITRE 7

MESURES HYDROLOGIQUES

Les mesures hydrologiques ont été réalisées durant l'année 1996 à deux échelles différentes : les parcelles expérimentales et les petits bassins versants (Cf chapitre 5). En 1997 et 1998, seuls les petits bassins versants ont fait l'objet d'observations hydrologiques.

7.1. Les données hydrométriques des parcelles expérimentales

7.1.1. Protocole expérimental

Huit parcelles ont été installées sur les bassins versants El Viejo et Carboneras. Elles sont décrites au chapitre 5, paragraphe 5.3.2, tableau 5.7. Les parcelles ont été réparties en quatre sites, ces sites étant regroupés par deux sur un même versant, l'un en position de piémont pour les parcelles les plus en amont, l'autre en position de haut glacis pour les parcelles les plus en aval. La figure 7.1 présente un schéma du dispositif expérimental installé sur le versant calcaire du bassin de Carboneras. Les événements pluvieux ont été enregistrés par un pluviographe localisé à moins de 150 mètres des dispositifs. Les volumes écoulés, ainsi que les transports solides, ont été mesurés au cours de la saison des pluies de l'année 1996. Des mesures de l'humidité du sol à 3 profondeurs (0 à 5 cm, 5 à 10 cm et 10 à 15 cm) ont également été effectuées la même année sur les quatre sites.

Le pluviographe installé sur le bassin Carboneras est mécanique à siphon. Sa précision est de 0,1 mm sur la mesure des hauteurs pluviométriques et de 5 minutes sur la mesure du temps. Le pluviographe installé sur le bassin El Viejo est du type OEDIPE à augets basculants. Sa précision est de 0,5 mm sur la mesure des hauteurs pluviométriques et de 1 seconde sur la mesure du temps.

Les parcelles, de superficie 60 m² (6 x 10 m), ont été limitées par de petites bordures en pierres et en terre, régulièrement entretenues. Des canaux de dérivation protègent l'amont des parcelles de l'entrée des eaux de ruissellement. Les bordures aval ont été consolidées par du ciment. Elles aboutissent, par l'intermédiaire d'un tube en PVC, à des fosses de réception d'environ 1,5 m³ de capacité. L'étanchéité de ces fosses est assurée par des bâches plastiques dans lesquelles sont recueillis les apports liquides et solides (figure 7.1). Les fosses sont recouvertes d'une bâche de protection contre les pluies. Une clôture en fil de fer barbelé protège les fosses contre l'intrusion du bétail, les parcelles n'étant pas mises en défens.

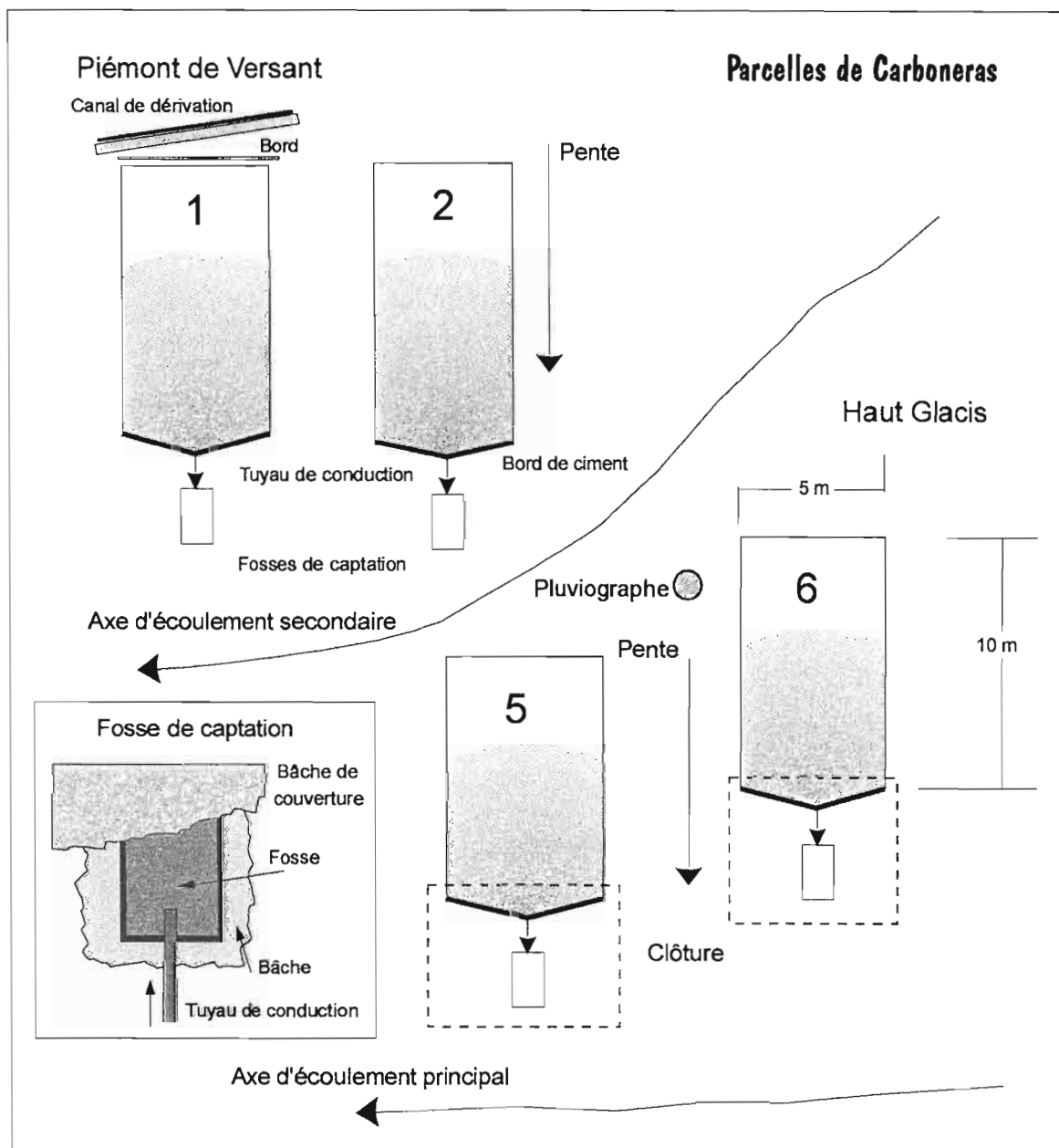


Figure 7.1. Schéma descriptif du dispositif des parcelles.

Les pluies survenant le plus souvent en fin d'après-midi, les mesures des volumes ruisselés et des sédiments dans les fosses étaient effectuées le lendemain matin. Après décantation des matières en suspension au fond des fosses, l'eau était brassée jusqu'à ce que le mélange ait une apparence homogène. Les volumes écoulés étaient mesurés avec des seaux de capacité 20 litres. Chaque seau était échantillonné avec une bouteille d'un litre dont le contenu était versé dans une autre seau où étaient recueillis tous les échantillons. Après un brassage énergique, l'eau de ce dernier seau était échantillonnée avec une bouteille d'un litre. Ce dernier échantillon intègre les matières solides en suspension transportées jusqu'à l'exutoire de la parcelle par le ruissellement. Lorsque le volume

écoulé était faible, des récipients de différentes capacités étaient utilisés (20 litres, 5 litres, ou 1 litre). Les transports solides déposés dans les canaux cimentés et dans le tube PVC étaient prélevés et pris en compte pour chaque événement. Les analyses granulométriques des sédiments ont été réalisées en laboratoire par la méthode Bouyoucos (1927).

7.1.2. Résultats

Deux types de résultats ont été obtenus pour l'année 1996 :

- une chronique des hauteurs pluviométriques, des lames ruisselées et des transports solides pour les huit parcelles de 50 à 60 m² ;
- une chronique de l'humidité des sols à proximité des parcelles en position de piémont et de haut glacis.

Ruissellement et transports solides

Le tableau 7.1 présente les résultats obtenus à l'échelle annuelle sur les sites El Viejo et Carboneras pour chacune des parcelles. Les résultats par événement sont présentés dans les tableaux de l'annexe VII.1.1.

Tableau 7.1. Tableau des mesures obtenues sur les parcelles de El Viejo et de Carboneras en 1996.

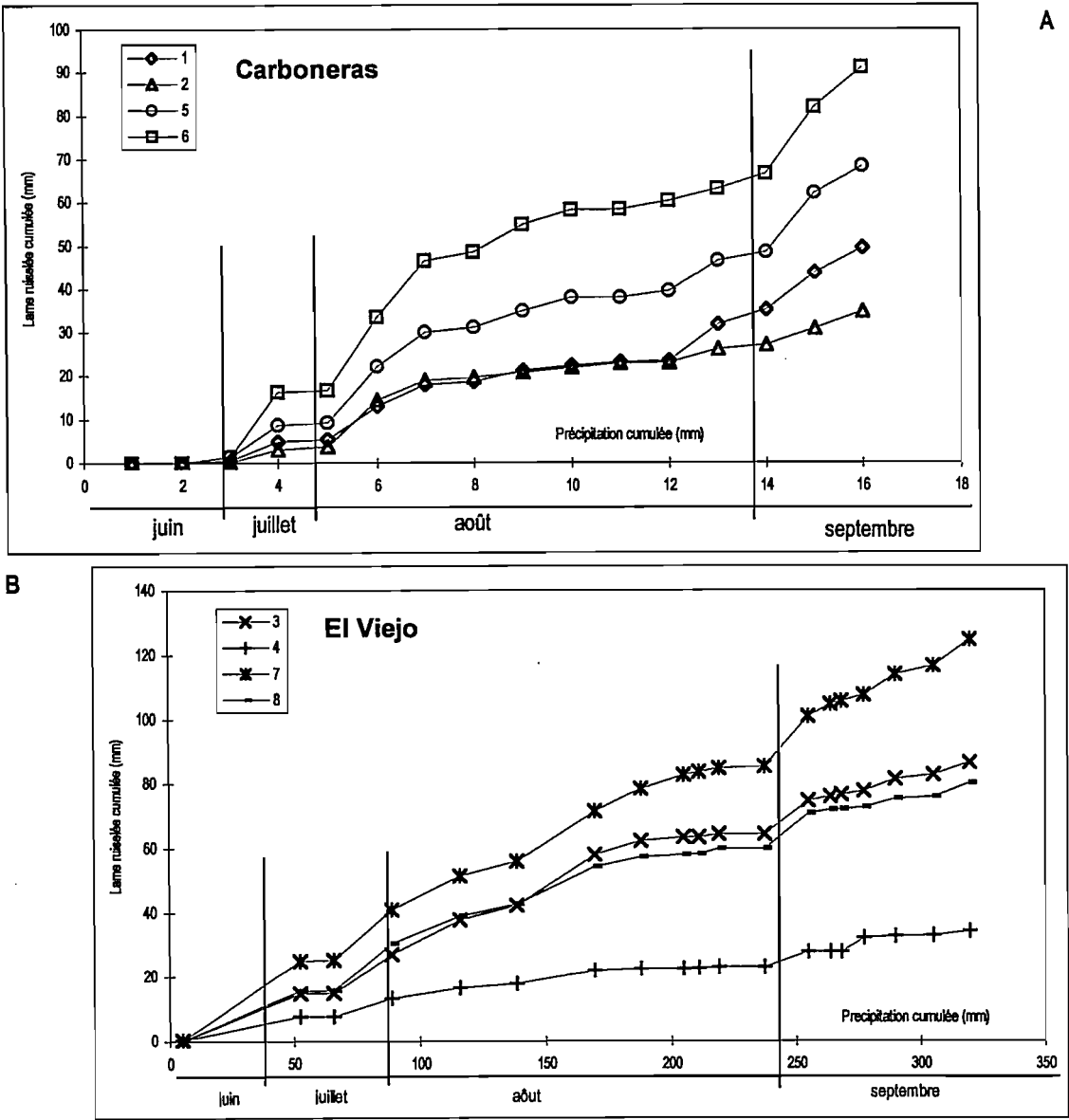
Sites	Piémont				Haut Glacis			
	Carboneras		El Viejo		Carboneras		El Viejo	
Identification des parcelles	1	2	3	4	5	6	7	8
Transports solides (t/ha/an)	0,89	1,67	8,28	6,16	4,5	3,69	15	13
Lame annuelle écoulée (mm)	52,2	35,8	86,5	34,1	72,2	95,4	124,7	80
Coef. de ruissellement (%)	11,2	7,7	15,6	6,2	15,5	20,5	22,5	14,4
Superficie (m ²)	61	62	65	65	59	62	53	68

Pluie annuelle pour le site de Carboneras : 465,2 mm ; Pluie annuelle pour le site de El Viejo : 554,5 mm

La figure 7.2 montre l'évolution de la lame ruisselée cumulée en fonction du temps sur les parcelles du bassin de Carboneras. Ce graphique met bien en évidence l'aptitude au ruissellement plus forte des parcelles de haut glacis par rapport à celles qui sont situées en amont, en position de piémont. Les différences de comportement entre parcelles sont importantes : la parcelle 6, où l'on observe le ruissellement le plus abondant, ruisselle 2,7 fois plus que la parcelle 2 où l'on observe le ruissellement le plus faible. Cette différence est encore plus forte sur le bassin de El Viejo où ce rapport atteint la valeur 3,6 entre les parcelles 7 et 4. Les coefficients annuels d'écoulement sont étalés sur une gamme de 6,5 à 23,6% pour les parcelles du site El Viejo, de 8,3 à 22,2% pour les parcelles du site Carboneras. Les coefficients maximums de ruissellement (annexe VII.1.1) peuvent être répartis en trois classes :

- 60 à 70 % sur les parcelles 6, 7 et 8,
- 40 à 60 % sur les parcelles 3 et 5,
- 20 à 40 % sur les parcelles 1, 2 et 4.

Le comportement des sols est donc comparable sur les deux bassins versants.



Sur le versant calcaire du bassin Carboneras, en se référant au tableau 5.7 du chapitre 5, on s'aperçoit que la teneur du sol en CaCO_3 explique en grande partie l'aptitude des sols au ruissellement. Ainsi, sur ce versant, l'ordre décroissant du coefficient annuel de ruissellement (CRA) suit l'ordre décroissant de la teneur du sol en CaCO_3 :

	Parcelle 6	Parcelle 5	Parcelle 1	Parcelle 2
CRA (%)	21	16	11	8
CaCO_3 total (%)	15	7,4	1,0	1,0

Sur le versant rhyolitique de El Viejo, l'aptitude des sols au ruissellement est en relation directe (Cf. tableau 5.7) avec la teneur en carbone total du sol comme facteur principal, avec la couverture végétale au sol comme facteur secondaire entre les parcelles 3 et 4 et la granulométrie du sol entre les parcelles 7 et 8:

	Parcelle 7	Parcelle 3	Parcelle 8	Parcelle 4
CRA	23	16	14	6
Carbone total (%)	2,0	3,3	2,2	3,6
Couverture végétale (%)	74	28	52	80
Refus à 2 mm (%)	59	40	38	49

En ce qui concerne les transports solides, la quantité de sédiments exportés varie de 2,5 à 15 t/ha/an selon les parcelles. On observe une différence très nette entre le versant calcaire et le versant rhyolitique : 1 à 5 t/ha/an pour le premier, 6 à 15 t/ha/an pour le second. On observe également, en relation avec les volumes ruisselés, une nette différence entre les parcelles amont (piémont) et les parcelles aval (haut glacis).

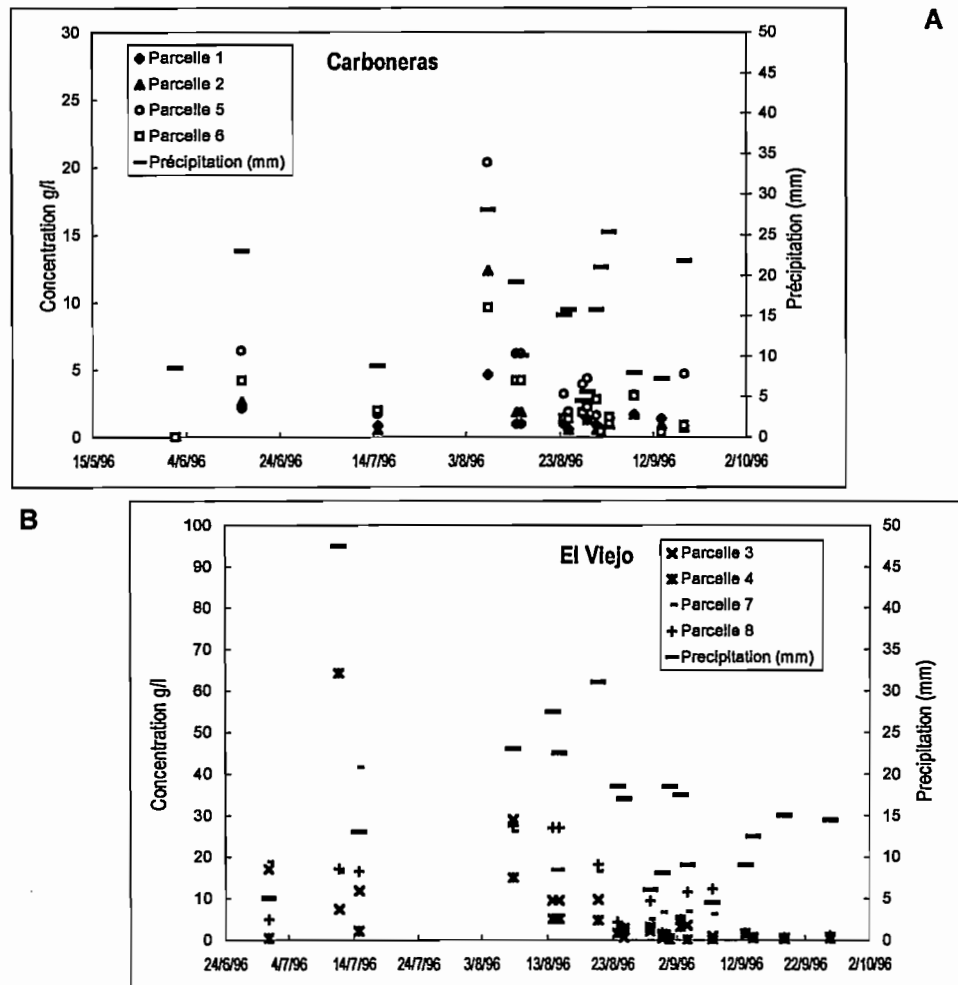


Figure 7.3. Concentrations et pluviométrie sur les parcelles des sites Carboneras (A) et El Viejo (B) au cours de l'année 1996.

La figure 7.3 montre la variabilité des concentrations moyennes au cours de la saison, faisant apparaître que les événements du début de saison présentent en général des concentrations beaucoup plus élevées, principalement sur les parcelles de haut glacis : parcelles 5 et 6 sur le versant calcaire de Carboneras; parcelles 7 et 8 sur le versant rhyolitique de El Viejo. Les écoulements intervenus le 7/08/96 représentent, en moyenne, 25 % de l'érosion annuelle mesurée sur chacune des parcelles et parfois plus de 50 % (parcelle 5).

Humidités des sols

Les résultats des mesures d'humidité, effectuées sur les 3 profondeurs de sol et sur chacun des sites, apparaissent sur l'annexe VII.1.2 et sur le tableau A pour le bassin de Carboneras, le tableau B pour le bassin El Viejo. La figure 7.4 montre l'évolution, en fonction du temps, de l'humidité du sol sur la tranche 0 à 10 cm pour les parcelles 1 et 6 du bassin de Carboneras. Sur cette figure, la pluie journalière est présentée sous la forme d'un histogramme inversé de telle sorte qu'il est possible de faire la relation entre les chutes de pluie et la recharge du stock hydrique des sols. La teneur moyenne en eau des sols de piémont (26 à 30% pour la parcelle 1) apparaît nettement plus forte au cours de la saison des pluies que celle des sols de haut glacis (18 à 20% pour la parcelle 6). Cette différence, plus atténuée, se retrouve également sur les sols de bassin de El Viejo. Cette observation conforte celles que nous avons fait précédemment sur l'aptitude au ruissellement plus importante des sols de haut glacis, aux pentes plus faibles (8 à 11 %) que celles des parcelles de piémont (15 à 18 %). On observe également (figure 7.4), après la saison des pluies, à partir du 6 octobre 1996, une décroissance plus rapide de l'humidité pour les sols de piémont (parcelle 1) que pour les sols de haut glacis (parcelle 6). Cette observation est à mettre en relation avec la texture des sols, plus sableuse sur la parcelle 1 (71 % de sables) que sur la parcelle 6 (61 %).

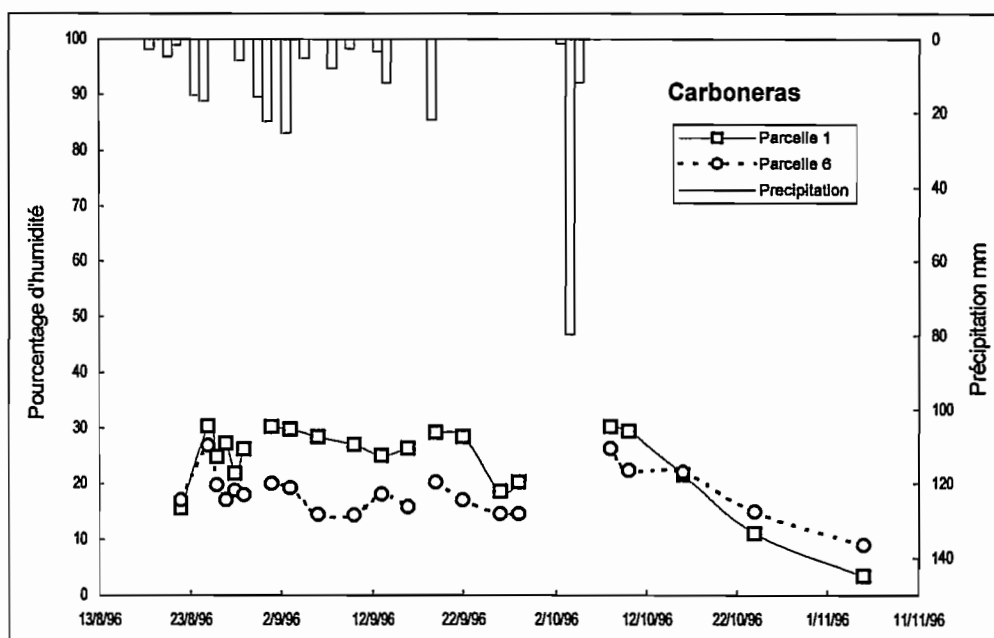


Figure 7.4 : Humidité du sol et précipitations sur les parcelles de Carboneras.

7.2. Les données hydrométriques des petits barrages

7.2.1. Méthodologie

Les observations hydrologiques réalisées à l'échelle des bassins versants ont pour objectifs de caractériser le fonctionnement hydrologique des bassins et l'usage des eaux superficielles stockées dans les petits barrages à l'échelle du ranch Atotonilco. Pour répondre à ce double objectif, nous avons équipé 7 petites retenues du matériel nécessaire à l'enregistrement continu des niveaux d'eau et à l'analyse de leur bilan hydrologique.

Pour chacune de ces retenues, l'équation du bilan d'eau peut s'écrire :

$$\Delta V = (V_r + V_s + V_p) - (V_{ev} + V_d + V_{id} + V_i + V_u) \quad (1)$$

où ΔV est la variation du volume d'eau stocké dans la retenue,
 V_r les apports en eaux superficielles dus au ruissellement sur le bassin versant,
 V_s les apports souterrains,
 V_p les apports d'eau de pluie tombant sur la retenue,
 V_{ev} le volume d'eau évaporé,
 V_d le volume d'eau déversé,
 V_{id} le volume infiltré au travers de la digue,
 V_i le volume infiltré au fond de la retenue,
 V_u le volume d'eau utilisé.

Dans cette équation, 6 termes peuvent être quantifiés à partir de mesures : ΔV , V_p , V_{ev} , V_d , V_{id} et V_u .

ΔV - Pour connaître les variations du volume stocké, il suffit de suivre les variations du plan d'eau et de déterminer la relation entre le niveau d'eau et le volume stocké. Cette relation est connue par des levés topographiques et bathymétriques de la retenue.

V_p - Les apports pluviométriques sont déterminés à partir des relevés effectués au pluviomètre de la retenue, en multipliant la hauteur de pluie par la superficie du plan d'eau. La relation cote-surface de la retenue permet d'obtenir les valeurs de cette superficie.

V_{ev} - Les volumes évaporés ont été calculés en considérant, outre la relation cote-surface, deux autres types de relations : d'une part la relation entre l'altitude et l'évaporation sur le bac classe A, établie grâce au réseau d'évaporimètres installés sur le ranch Atotonilco, d'autre part les relations entre l'évaporation sur le bac classe A et l'évaporation sur le bac flottant, établies sur la retenue du petit barrage de Zapata (Cf. chapitre 6, figure 6.1).

V_d - Les volumes déversés sont calculés à partir de la courbe d'étalonnage du déversoir du barrage. Cette courbe est obtenue en effectuant des jaugeages pendant les déversements pour différentes cotes aux échelles limnimétriques.

Vid - Les volumes infiltrés au travers de la digue peuvent être calculés, pour leur composante superficielle, à partir de jaugeages réalisés en aval du barrage en l'absence de déversement.

Vu - Le volume d'eau utilisé pour l'abreuvement du bétail peut être prélevé directement par les animaux qui viennent boire dans la retenue, ou indirectement par pompage pour alimenter le réseau d'abreuvoirs. En pratique, il est très difficile de connaître avec précision la quantité d'eau ainsi utilisée et nous nous contenterons de faire l'estimation des volumes prélevés à partir du décompte des têtes de bétail par enclos et de leur consommation moyenne journalière.

Les autres termes de l'équation du bilan d'eau, c'est à dire Vr, Vi et Vs, ne peuvent être quantifiés que de manière indirecte :

Vr - Pendant la phase de ruissellement, l'équation du bilan peut être simplifiée en considérant les apports souterrains (Vs) négligeables; les volumes évaporés (Vev), infiltrés (Vid + Vi) et utilisés (Vu) étant très petit par rapport aux volumes ruisselés. L'équation simplifiée s'écrit donc :

$$V_r = \Delta V - V_p + V_d \quad (2)$$

Le volume ruisselé est alors calculé en comptant positivement la variation de volume stocké (ΔV) lorsqu'il y a accroissement de la cote du plan d'eau, négativement en cas de décroissance. Par l'estimation du volume déversé, la courbe de tarage du déversoir joue un rôle essentiel dans l'estimation du volume ruisselé en phase de déversement. Sur les sept retenues, ayant fait l'objet d'observations hydrologiques dans le ranch Atotonilco, trois seulement ont connu des déversements au cours des années 1996 et 1997 : les retenues des *presones* Carboneras, El Viejo et El Tullido.

En l'absence de déversement, l'équation se simplifie encore et prend la forme suivante :

$$V_r = \Delta V - V_p \quad (3)$$

Vs et Vi - Les volumes des apports souterrains et les volumes infiltrés au fond de la retenue seront calculés par résolution de l'équation du bilan après détermination des autres termes. Ainsi, en l'absence de ruissellement, l'analyse du bilan hydrologique d'une retenue permet d'estimer soit le volume d'eau infiltré, lorsque les apports souterrains sont négligeables, soit la différence entre les apports souterrains et les volumes infiltrés.

En période sèche, le bilan d'eau de la retenue n'est influencé que par l'infiltration, l'évaporation et l'utilisation des eaux de la retenue. Avec l'annulation des termes de ruissellement (Vr), de déversement (Vd) et des apports pluviométriques (Vp), l'expression du bilan (équation 1) prend donc la forme suivante :

$$\Delta V = V_s - (V_{ev} + V_{id} + V_i + V_u) \quad (4)$$

Le déstockage de la retenue est alors mesuré par la décroissance des niveaux d'eau qui résulte de la différence entre les seuls apports souterrains et les pertes par infiltration, évaporation et utilisation.

Observation des hauteurs d'eau

En l'absence de déversement, la mesure des hauteurs d'eau dans la retenue a pour seul objectif de déterminer le volume stocké ou déstocké (ΔV) en couplant les mesures de hauteur d'eau avec la courbe cotes-volumes. En phase de déversement, la mesure des hauteurs d'eau fournit également les débits déversés (équation 2). En période sèche, la décroissance des niveaux d'eau est due à l'infiltration, à l'évaporation et aux divers prélèvements (équation 4) et en négligeant les apports souterrains, ces trois phénomènes sont mesurés globalement par la décroissance des niveaux d'eau.

Chacune des 7 retenues a été équipée d'une batterie d'échelles limnimétriques et d'un limnigraphe mécanique, placés à l'extrémité d'une passerelle d'accès permettant de surplomber la partie la plus basse de la cuvette (photo. 1). Les limnigraphes utilisés (modèle Rossbach) sont à enregistrement journalier. En raison de leur système de transmission mécanique, ils ont une sensibilité de un centimètre à la mesure des hauteurs d'eau, à la montée du niveau d'eau comme à la descente. Par ailleurs, le maximum de précision dans l'enregistrement du temps est de 10 minutes, tant en raison de la transmission mécanique que de l'épaisseur du trait de plume. Pour la lecture des échelles, la précision maximale que l'on peut obtenir dans la pratique est le demi-centimètre, principalement en raison des oscillations du plan d'eau sous l'effet du vent.

Les limnigrammes sont calés avec les hauteurs d'eau observées tous les matins à 8 heures aux échelles limnimétriques. Ils ont été digitalisés et traités à l'aide du logiciel Hydrom (Orstom 1989). On obtient ainsi la chronique des cotes constituée de couples temps-hauteurs d'eau dans la retenue. Le bilan d'eau journalier est établi à partir de la hauteur observée à 8 heures du matin, heure à laquelle ne surviennent généralement pas d'averses et où il n'y a de ce fait pas de débordement; le pas de temps de 10 minutes est utilisé pour définir l'hydrogramme de crue.

Relations cotes-surfaces et cotes-volumes

Après assèchement des retenues, les courbes hauteurs-volumes et hauteurs-surfaces des différentes cuvettes ont été déterminées par des levés topographiques selon une maille de 5 x 5 mètres qui correspond à un minimum de 65 points pour la retenue la plus petite, celle d'El Muerto, et un maximum de 360 points pour la plus grande retenue, celle de Pastelero. Les nivellements sont rattachés aux échelles limnimétriques. Leur dépouillement consiste à établir une carte topographique par retenue en utilisant la méthode du krigeage pour interpoler entre les différents points cotés (figure 7.5). A partir de ce plan topographique, nous avons déterminé de 10 en 10 centimètres les superficies et les volumes correspondant entre les cotes minimales et maximales observées (tableau 7.2.).

Les plans topographiques des retenues et les barèmes des cotes-surfaces et cotes-volumes sont fournis aux annexes VII.2.1 à VII.2.5.

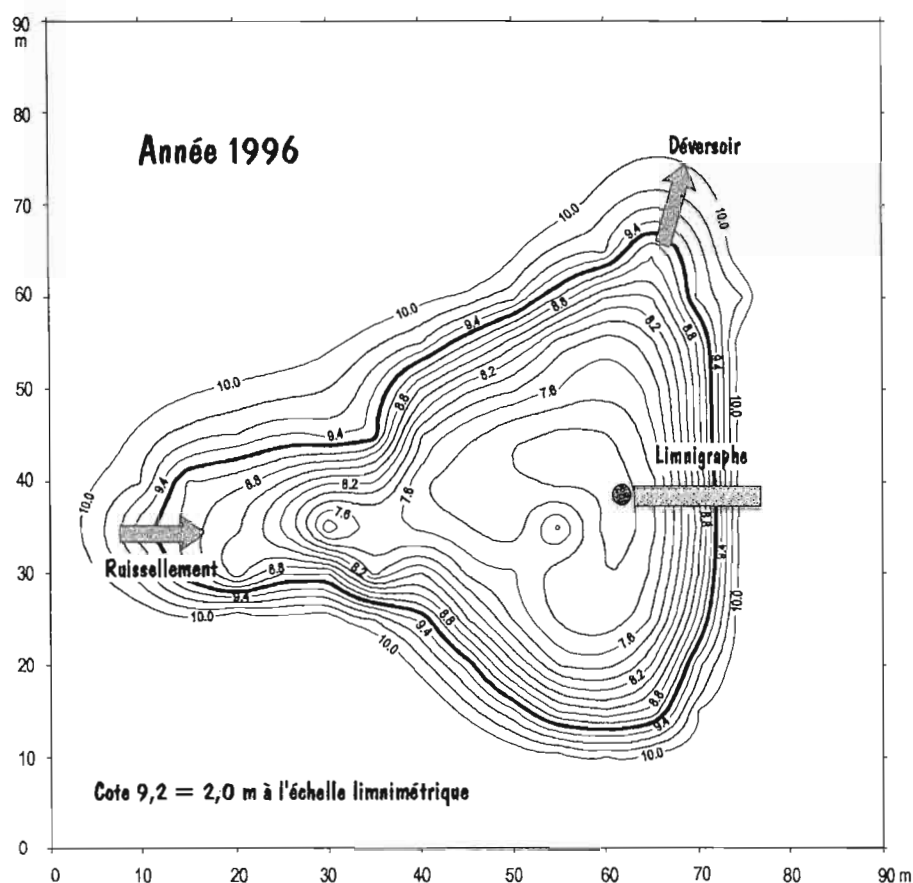


Figure 7.5. Topographie de la retenue de Carboneras pour l'année 1996 (nivellement de mars 1996).

Tableau 7.2. Barèmes des relations cotes-surfaces et cotes-volumes de la retenue Carboneras pour les années 1996 et 1997.

1996		1997		1996		1997	
Cote	Volume	Surface	Volume	Surface	Cote	Volume	Surface
cm	m ³	m ²	m ³	m ²	cm	m ³	m ²
0,0	0	0			140	990	1260
10,0	4	90			150	1120	1330
20,0	20	230			160	1260	1400
30,0	50	350	0	0	170	1400	1470
40,0	90	470	40	470	180	1550	1540
50,0	140	580	90	570	190	171	1600
60,0	200	690	150	690	200	1880	1650
70,0	280	780	230	780	210	2040	1700
80,0	360	850	310	850	220	2210	1760
90,0	450	920	400	920	230	2390	1810
100,0	540	980	490	980	240	2570	1860
110,0	650	1050	600	1050	250	2760	1920
120,0	750	1120	700	1120	260	2960	1980
130,0	870	1180	820	1180			

Cote de déversement : 2,0 m

Les sédiments déposés dans la retenue au cours des fortes crues viennent perturber le barème cotes-volumes. Nous présentons les barèmes correspondant aux années 1996 et 1997 pour la retenue du barrage de Carboneras sur le tableau 7.2. Ces barèmes montrent que la sédimentation dans la retenue pour l'année 1996 a été d'environ 50 m³. Aucune des sept retenues n'a été curée pendant la période d'observation. Il n'a donc pas été nécessaire de refaire la topographie de chacune d'entre elles ailleurs que dans la partie basse envasée.

Relations cotes-débits par jaugeage et étalonnage des déversoirs

Pour mesurer les débordements hors des cuvettes, des jaugeages au moulinet ont été effectués au cours de la saison 1996, seule année pendant laquelle nous avons observé des déversements. Trois barrages sont concernés : El Tullido, Carboneras et El Viejo.

Les jaugeages ont été réalisés en mesurant les vitesses du courant point par point. L'exploration des sections mouillées a été effectuée à gué, verticale par verticale, à raison de un à cinq points par verticale : un point pour les faibles hauteurs d'eau (inférieure à 25 cm), cinq points pour les hauteurs supérieures à un mètre. Seul le déversoir du barrage de El Tullido a présenté des hauteurs déversées supérieures à un mètre. Les déversoirs de El Viejo et de Carboneras n'ont subi que des hauteurs de submersion inférieures à 50 cm.

Chaque jaugeage a été dépouillé verticale par verticale pour le calcul des débits unitaires et nous avons ensuite procédé à l'intégration de ces débits en fonction de la position des verticales dans la section mouillée. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel HYDROM 2 (ORSTOM 1989). A chaque jaugeage, nous avons associé une seule cote en calculant la moyenne des cotes observées en cours de jaugeage.

Pour les trois déversoirs des barrages El Tullido, El Viejo et Carboneras, nous avons tracé, à partir des listes de jaugeages, les courbes de tarages correspondantes. Pour le barrage El Tullido, des jaugeages ont pu être effectués en hautes et basses eaux. Une interpolation a donc été réalisée entre ces cotes extrêmes. En moyenne, trois ou quatre jaugeages ont été réalisés par déversoir. En définitive, la précision dans l'estimation des plus forts débits déversés se situe entre 20 et 30 %.

Mesures de la sédimentation dans les retenues

La mesure de la sédimentation dans les retenues a été effectuée annuellement par dépouillement des relevés topographiques (Camus *et al.* 1995). Une borne de nivellement en béton, surmontée d'un fer de diamètre 7 mm servant de repère topographique, a été installée sur chaque digue. La figure 7.6 présente la topographie de la retenue Carboneras pour l'année 1997. La comparaison du nivellement de mars 1996 (figure 7.5) et du nivellement de mars 1997 (figure 7.6), montre un comblement de la partie inférieure de la retenue entre les cotes 7,20 et 7,44 m. En réalité, les dépôts d'alluvions se font sur l'ensemble de la retenue mais sur de faibles épaisseurs hors de la zone basse. Par exemple, sur la figure 7.7 nous présentons en trait gras les profils transversaux de la retenue Carboneras dans l'axe d'écoulement principal (transversale 38) pour l'année 1996, en trait fin pour l'année 1997. On peut ainsi observer l'existence de dépôts sur une distance d'une

quarantaine de mètres dans la partie la plus basse de cette transversale. Ces dépôts suivent la topographie du fond de la retenue et leur épaisseur varie d'un endroit à l'autre. Elle est plus importante dans les creux, plus faible sur les buttes.

Afin de mieux estimer les volumes annuels des sédiments stockés, nous avons resserré la maille topographique en effectuant des levés avec un espacement de 1 mètre entre chaque point sur les fonds des retenues. La figure 7.7 montre l'effet de l'envasement de la retenue de Carboneras sur le tracé des courbes cotes-surfaces et cotes-volumes.

7.2.2 - Dépouillement et qualité des données

L'analyse du bilan hydrologique des différentes retenues a été faite en considérant deux situations : d'une part les périodes de crue pendant lesquelles les apports superficiels sont prédominants et d'autre part les périodes sans crue pendant lesquelles aucun ruissellement ne vient perturber l'évolution du plan d'eau de la retenue.

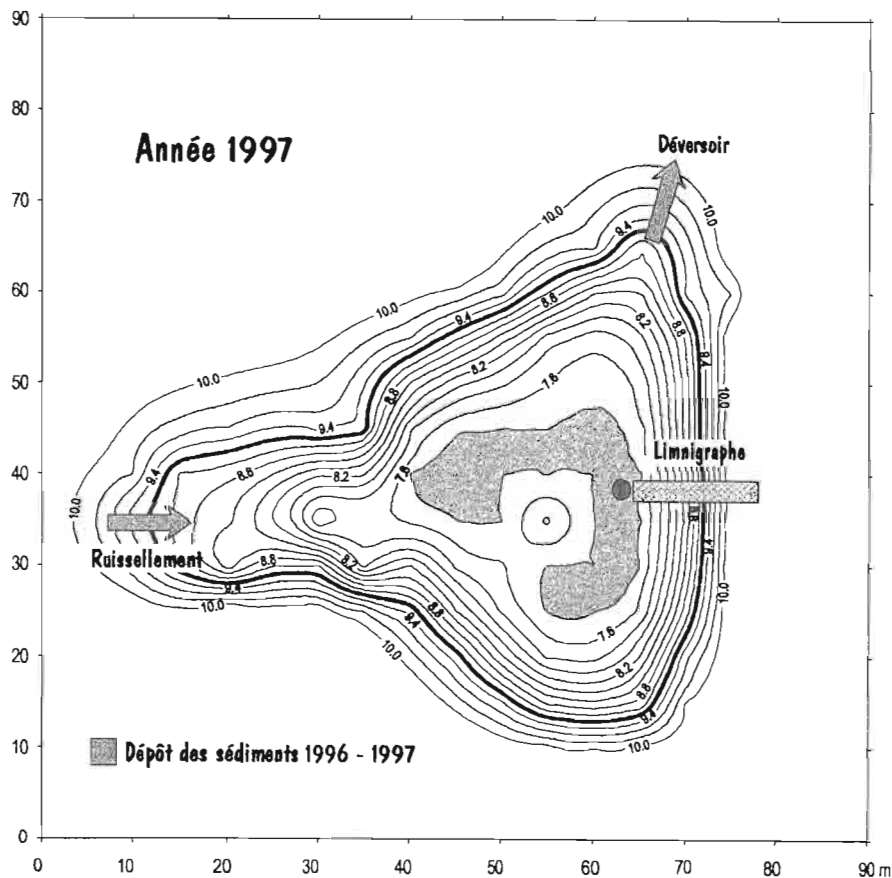


Figure 7.6. Topographie de la retenue de Carboneras pour l'année 1997 (nivellement effectué en mars 1997).

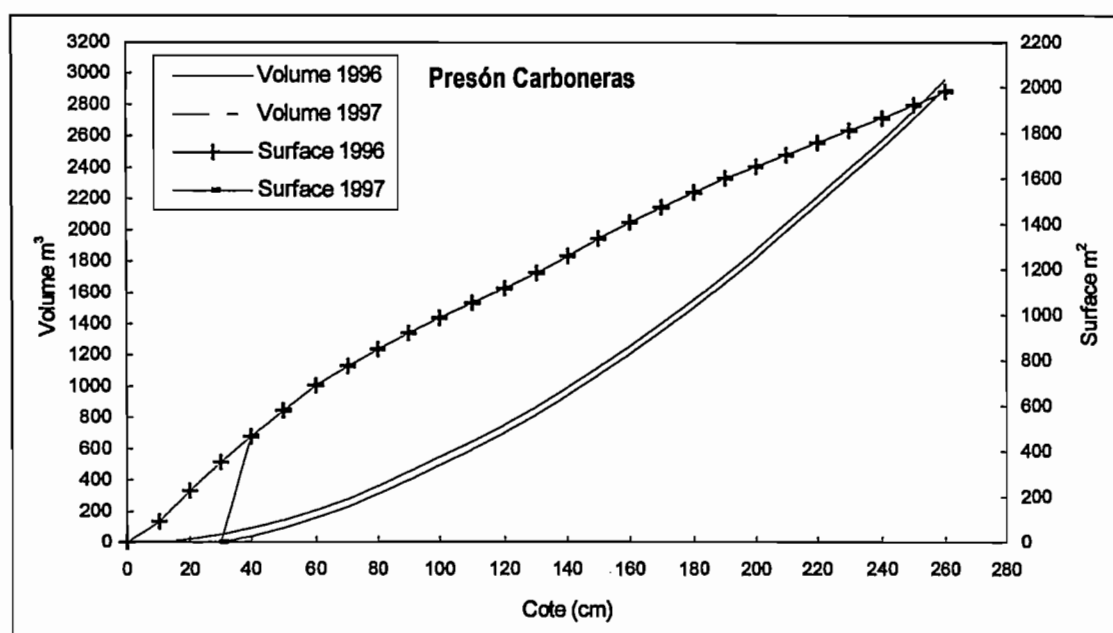


Figure 7.7. Courbes cotes-surfaces et cotes-volumes de la retenue Carboneras pour les années 1996 et 1997.

Analyse du bilan d'eau en période sèche

Dans le ranch Atotonilco, quelques *presones*, tel le *presón Zapata*, présentent une lente décroissance des niveaux d'eau, due essentiellement à des apports souterrains. Ce n'est pas le cas des sept *presones* étudiés pour lesquels nous pouvons donc considérer que le terme correspondant aux apports souterrains (V_s) est égal à zéro.

Pour le volume évaporé, le réseau d'évaporimètres (bacs classe A) nous permet d'établir, en fonction de la saison, plusieurs relations entre l'altitude et l'évaporation (chapitre 6, paragraphe 6.2.2, figure 6.8).

Nous pouvons ainsi déterminer les évaporations journalières à proximité des *presones* étudiés en considérant les observations effectuées aux altitudes encadrant celle du *presón*. Les calculs sont effectués en supposant que, pour deux altitudes suffisamment proches, l'évolution de l'évaporation est linéaire en fonction de l'altitude. Nous fournissons au tableau 7.3 les équations utilisées pour le calcul de l'évaporation sur les *presones*.

Tableau 7.3. Equations utilisées pour calculer l'évaporation des retenues.

Evaporation Pastelero	=	0,76 Eva Zap	+	0,24 Eva Viejo
Evaporation El Viejo	=	0,45 Eva Zapata	+	0,55 Viejo bordo
Evaporation El Muerto	=	0,42 Eva Zap	+	0,58 Eva Viejo
Evaporation Carboneras	=	0,42 Eva Zap	+	0,58 Eva Viejo
Evaporation El Tullido	=	Eva Zapata		

En moyenne, l'évaporation journalière des retenues varie de 3 à 8 mm. Elle est minimale de novembre à janvier, maximale de février à mai. En saison des pluies, l'évaporation est proche de la valeur zéro le lendemain d'un jour de pluie. Sa valeur maximale peut atteindre 10 mm.

Dans le ranch Atotonilco, les volumes d'eau prélevés dans les *presones* servent uniquement à l'alimentation du bétail. Pour les sept *presones* étudiés, nous n'avons pas observé de prélèvement par siphonnage pour alimenter les abreuvoirs, seuls sont effectués des prélèvements directs par le bétail. Ceux-ci sont estimés en tenant compte d'une part de la consommation d'eau moyenne journalière par tête, qui varie avec le sexe et l'âge de l'animal, et d'autre part du nombre de têtes de bétail par enclos (*cerco* ou *potrero*) et du nombre d'abreuvoirs, le *presón* étant considéré de la même façon que les autres types d'abreuvoirs (bacs circulaires, bacs toriques en ciment, gouttières en acier ou en ciment). A titre d'exemple le *presón* Carboneras se situe dans l'enclos Cerro Ancho qui compte également le *presón* El Muerto ainsi que trois abreuvoirs pour environ 53 vaches dont la consommation est estimée à 40 litres par jour. Le prélèvement moyen journalier sur le *presón* Carboneras est donc estimé à : $(53 \times 40) / 5 = 424$ litres par jour.

En ce qui concerne l'infiltration, c'est un terme du bilan qui ne peut être estimé directement mais que se déduit de l'équation (4) à partir de la connaissance des autres termes du bilan. Il n'est pas possible de séparer l'infiltration au fond de la retenue de l'infiltration au travers de la digue. En outre, nous n'avons pas observé de suintement superficiel en aval des *presones*. On peut donc considérer que l'infiltration au travers de la digue est négligeable par rapport à l'infiltration au fond de la retenue. Celle-ci est donc calculée en soustrayant l'évaporation et les prélèvements au déstockage de la retenue. En général, le volume utilisé reste faible comparé aux volumes évaporé et infiltré. Ainsi, pour le barrage de Carboneras, il ne joue un rôle significatif que pour des cotes inférieures à 50 cm aux échelles limnimétriques.

La figure 7.8 présente la décroissance du plan d'eau de Carboneras entre le 2 octobre 1996 et le 1^{er} décembre 1997. Figurent également sur ce dessein les valeurs de l'évaporation et de l'infiltration sur des périodes de 10 jours. On peut ainsi remarquer que l'infiltration est maximale (20 mm/jour) lorsque la cote du plan d'eau est maximale (entre 1,6 et 2 mètres). Elle décroît ensuite plus ou moins régulièrement avec la cote du plan d'eau pour atteindre des valeurs minimales de 3 à 4 mm/jour à la fin de l'année 1997. Pour les autres *presones*, les valeurs maximales de l'infiltration sont de l'ordre de 50 à 60 mm/jour pour le *presón* Pastelero au-dessus de la cote 2,5 mètres, 100 mm/jour pour le *presón* Oso Negro, 200 mm/jour pour le *presón* El Molino.

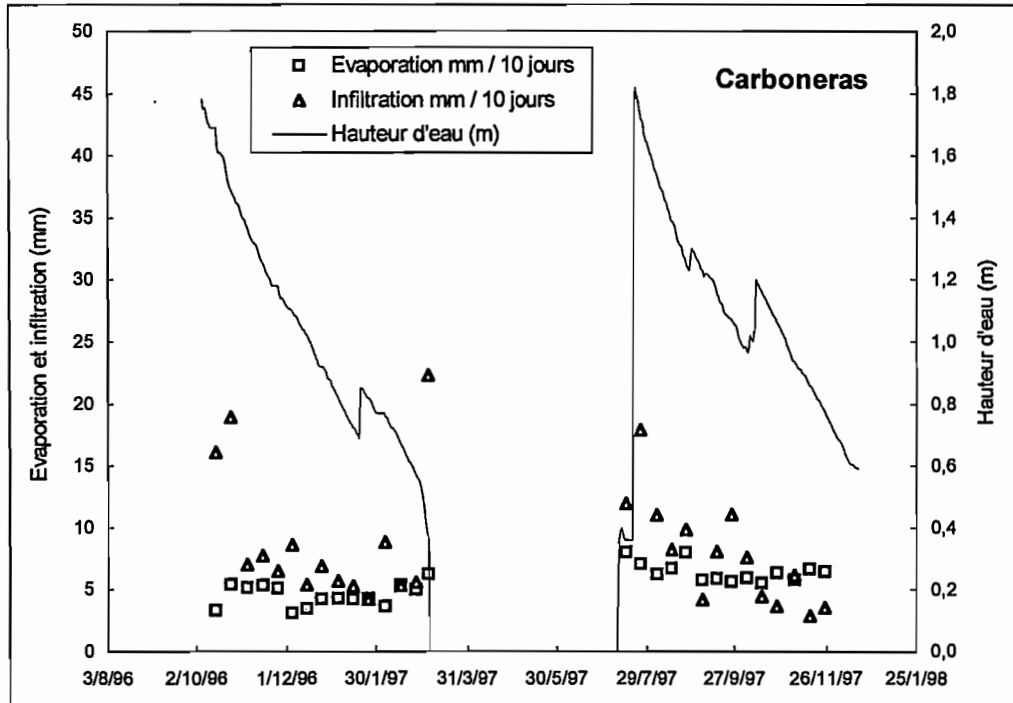


Figure 7.8. Décroissance du plan d'eau de Carboneras entre le 2 octobre 1996 et le 1^{er} décembre 1997.

Analyse du bilan d'eau en période de crue

En période de crue, il faut distinguer deux phases : une première phase de stockage dans la retenue sans déversement et une seconde phase avec déversement. Abstraction faite des erreurs sur l'estimation des cotes du plan d'eau et du temps (paragraphe 7.2.1), la précision dans la détermination des volumes ruisselés en l'absence de déversement ne dépend que de la précision du levé topographique et de l'importance relative des termes du bilan considérés comme négligeables par rapport au volume ruisselé. Pendant la phase de déversement, la précision dans l'estimation des volumes ruisselés dépend principalement de la précision de l'étalonnage du déversoir.

En phase de stockage sans déversement, nous avons effectué le calcul du bilan d'eau des retenues au pas de temps de 10 mn en utilisant l'équation (3). A cette échelle de temps, le volume évaporé (V_{ev}) devient en effet négligeable, d'autant que l'air est saturé de vapeur d'eau pendant un certain temps après l'averse. Le volume utilisé (V_u) est également négligeable car le bétail reste à l'abri pendant l'averse et un certain temps après. En ce qui concerne le volume infiltré ($V_{id} + V_i$), il peut être le plus souvent négligé lorsqu'on le compare à la montée des niveaux d'eau. Ainsi, pour la retenue de Carboneras, l'infiltration maximale est de 20 mm/jour soit 0,14 mm en 10 minutes. Même pour une différence de cote de 1 centimètre, l'erreur commise en négligeant l'infiltration n'est donc que de 1,4 % sur la hauteur d'eau. L'infiltration pourra donc être négligée de manière systématique sur la plupart des retenues, sauf pour les retenues El Molino sur basalte et Oso Negro sur conglomérat basaltique dont les cuvettes sont très filtrantes (100 à 200 mm/jour).

En phase de déversement, on utilise l'équation (2) du bilan d'eau dans les retenues. Le tableau 7.4 montre les calculs effectués pour la crue du 07/08/1996 dans la retenue du barrage de Carboneras. Ces calculs s'inspirent des travaux d'Albergel (1998) sur les lacs collinaires tunisiens.

L'imprécision sur la courbe d'étalonnage du déversoir est forte pour les faibles débits déversés. En effet, la dimension de l'hélice du moulinet utilisé (10 à 12 centimètres) ne nous a pas permis de mesurer les débits pour des cotes inférieures à 20 centimètres au-dessus de la cote de déversement. Pour les forts débits, c'est la variation des cotes pendant les jaugeages qui limite la précision dans leur estimation, l'erreur étant estimée à plus ou moins 25 %. Pour les faibles débits déversés, en l'absence de ruissellement et de pluie, les volumes déstockés sont égaux aux volumes déversés. Il est donc possible de préciser le dessin de la courbe de tarage du déversoir en utilisant l'équation du bilan d'eau de la retenue en phase de déversement sans apports par ruissellement.

Tableau 7.4. Exemple de calcul des débits ruisselés en amont de la retenue du barrage de Carboneras pour la crue du 07/08/1996.

Ruissellement							Précipitation		
Date / Heure	Cote (m)	Volume stocké cumulé (m ³)	Débit (m ³ /s)		Volume m ³		Date	Intensité mm/h	Volume précipité dans la retenue (m ³)
			Entrant	Sortant	Entrant	Sortant			
7-8-96 20:10	0,000	0							
7-8-96 20:20	0,000	0	0,0000	0,00	0	0	7-8-96 20:20	0,0	0,0
7-8-96 20:30	0,000	0	0,0517	0,00	31	0	7-8-96 20:30	39,6	0,0
7-8-96 20:40	0,296	62	0,7625	0,00	452	0	7-8-96 20:40	87,6	5,5
7-8-96 20:50	1,340	915	2,5566	0,00	1527	0	7-8-96 20:50	32,4	6,6
7-8-96 21:00	2,673	3130	2,2440	0,33	1344	199	7-8-96 21:00	7,4	2,6
7-8-96 21:10	2,712	3210	0,4404	0,40	264	239	7-8-96 21:10	1,2	0,4
7-8-96 21:20	2,697	3180	0,1728	0,37	104	224	7-8-96 21:20	0,4	0,1
7-8-96 21:30	2,596	2970	0,0000	0,22	0	130	7-8-96 21:30	0,0	0,0
7-8-96 21:40	2,558	2890	0,0384	0,17	22	102			
7-8-96 21:50	2,516	2810	0,0209	0,13	13	78			
7-8-96 22:00	2,491	2760	0,0000	0,11	0	64			
7-8-96 22:10	2,450	2680	0,0000	0,08	0	48			
7-8-96 22:20	2,419	2620	0,0000	0,08	0	35			
7-8-96 22:30	2,398	2580	0,0000	0,05	0	29			
7-8-96 22:40	2,367	2520	0,0000	0,03	0	21			
7-8-96 22:50	2,346	2480	0,0000	0,03	0	16			
7-8-96 23:00	2,319	2430	0,0000	0,02	0	12			
7-8-96 23:10	2,292	2380	0,0000	0,01	0	9			
7-8-96 23:20	2,281	2360	0,0000	0,01	0	7			
7-8-96 23:30	2,265	2330	0,0000	0,01	0	6			
7-8-96 23:40	2,248	2300	0,0000	0,01	0	5			
7-8-96 23:50	2,232	2270	0,0000	0,01	0	4			
8-8-96 0:00	2,221	2250	0,0000	0,01	0	4			
8-8-96 0:10	2,215	2240	0,0000	0,01	0	3			
8-8-96 0:20	2,204	2220	0,0000	0,01	0	3			
8-8-96 0:30	2,193	2200	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 0:40	2,182	2180	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 0:50	2,170	2160	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 1:00	2,159	2140	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 1:10	2,153	2130	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 1:20	2,142	2110	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 1:30	2,136	2100	0,0000	0,00	0	3			
8-8-96 1:40	2,131	2090	0,0000	0,00	0	3			
TOTAL					3779	1343			15

Dans tous les cas, la précision des levés topographiques et la précision des mesures de hauteur d'eau influent sur l'estimation des volumes ruisselés. Ainsi par exemple, une erreur de un centimètre sur la hauteur du plan d'eau de Carboneras à la cote de 2 mètres représente un volume de $16,3 \text{ m}^3$, 12 m^3 à la cote 1,4 mètre, $5,2 \text{ m}^3$ à la cote 50 cm. Cette même erreur sur la cuvette de El Viejo représente respectivement des volumes de 59, 25, et 13 m^3 . Pour limiter ce type d'erreur, nous calculerons l'équation du bilan d'eau des retenues sur des pas de temps suffisamment longs pour que l'accroissement ou la décroissance aient une amplitude de 10 centimètres, ce qui donne une précision de 10 % sur l'estimation des volumes. Cette imprécision est surtout à prendre en compte au niveau de son impact sur les différents événements analysés. Dans le cas des petites crues, cette erreur peut représenter plus de 20 % du volume de la crue, mais seulement 1 à 2 % du volume dans le cas des crues importantes.

Dépouillement des données de sédimentation

Les levés topographiques de la partie basse des retenues, effectués chaque année en saison sèche au pas d'un mètre avec les mêmes repères topographiques, permettent d'établir avec une bonne précision les courbes de niveau qui servent au calcul des volumes sédimentés. Hors de la zone basse, les relevés topographiques sont effectués au pas de 5 m. L'interpolation linéaire permet d'obtenir une grille topographique suivant une maille de 1 x 1 mètre pour toute la retenue. Nous avons ainsi établi, pour chacune des 7 retenues et pour les années 1996 et 1997, des modèles numériques de terrain au pas d'espace d'un mètre. La superposition de deux modèles numériques à des dates différentes pour une même retenue permet de calculer les volumes de sédiments déposés entre ces deux dates. Les figures 7.5 et 7.6 présentent, pour la retenue de Carboneras, les courbes de niveaux de la retenue au pas d'altitude de 20 centimètres.

Pour les retenues qui n'ont pas présenté de déversement, la totalité des transports solides s'est déposée dans les cuvettes. Dans ce cas, les volumes de sédiments correspondent aux transports solides annuels qui auraient été exportés par les crues hors des bassins versants en l'absence de barrage. Pour les retenues qui ont déversé (Carboneras, El Viejo et El Tullido), seuls les sédiments déposés dans les retenues ont été mesurés. Les eaux évacuées par les déversoirs n'ayant pas été échantillonnées, les sédiments déversés n'ont pu être estimés. Pour ces retenues, les volumes de sédiments déposés dans les retenues constituent donc des estimations par défaut des transports solides annuels. Tous les levés topographiques ont été réalisés au cours des mois de mars et avril, en pleine saison sèche, à des états d'humidité des sédiments sensiblement identiques. La plupart des sédiments sont composés d'éléments fins, principalement des argiles dont la densité apparente moyenne est de $1,85 \text{ g/cm}^3$ (Loyer et Plenecassagne 1996). En prenant cette valeur comme densité moyenne des sédiments stockés dans les retenues, on peut calculer les tonnages annuels transportés par les crues. Le tableau 7.5 présente, pour la saison 1996, les volumes et les poids de sédiments observés dans cinq retenues. Les poids des sédiments, rapportés aux superficies des bassins versants, varient de 2,4 t/ha/an pour le bassin El Viejo à 0,9 t/ha/an pour le bassin El Tullido. Le *presón* Pastelero présente une valeur anormalement élevée de sa sédimentation (2,3 t/ha/an), laquelle semble due surtout au surcreusement de la cuvette et à l'érosion de ses bords, principalement dans sa partie amont. Elle ne peut donc être comparée aux autres valeurs de sédimentation qui semblent avoir pour

cause principale l'existence de lits mineurs très encaissés, aux sols "à vif", juste en amont des retenues.

Tableau 7.5. Volumes et poids des sédiments dans 5 retenues pour l'année 1996.

Bassin Versant	Volume m3	Volume * Da (1,7 gr/cm3) T	Erosion spécifique T/ha
Carboneras	107,3	182,4	1,7
El Muerto	8,9	15,01	1,0
El Viejo	245,6	417,5	2,4
Pastelero	229,8	390,7	2,3
Tullido	206,7	351,4	0,9

7.2.3. Les résultats

Les données pluviométriques

Les pluviographes installés sur les bassins versants du ranch Atotonilco ont fait l'objet d'un dépouillement au pas de temps de 10 minutes pour les années 1996 et 1997. Les résultats de ces dépouillements sont présentés aux annexes VII.3.1 à VII.3.7 sur la forme de hyétogrammes centrés. Deux colonnes supplémentaires sont réservées dans chaque tableau à la présentation de la pluie enregistrée au pluviographe d'une part, de la pluie moyenne sur le bassin versant d'autre part. Pour certains événements de longue durée, par exemple l'averse du 24/8/1996 sur le tableau 7.6, le hyétogramme est tronqué. La partie placée sur le tableau correspond à la phase la plus intense de l'averse sous laquelle nous avons placé une seconde ligne où sont indiquées les minutes écoulées depuis le début de l'averse. Pour les autres hyétogrammes, la première intensité correspond au début de l'averse.

Les pluies journalières moyennes par bassin sont présentées aux annexes VII.4.1 à VII.4.5. L'estimation de la précipitation moyenne sur chacun des bassins a été effectuée par la méthode des polygones de Thiessen qui permet de déterminer l'aire d'influence de chacun des pluviomètres situés sur un bassin en dessinant les polygones à partir des médiatrices des segments définis par les positions des postes pluviométriques sur le bassin. Les moyennes de chacun des événements pluvieux sont présentées sur les tableaux des hyétogrammes centrés.

Tableau 7.6. Hyétogrammes centrés à la station pluviographique de Carboneras pour l'année 1996.

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluvog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum																	
29-05-96 21:15	1,3	1,3								1,3	2,8	1,1	1,3	1,2						
12-06-96 16:08	1,9	1,9								1,8	7,8	1,8								
12-06-96 22:02	1	1,7								1,3	0,5	4,2								
13-06-96 20:39	4,8	3,0										22,8	5,5	0,5						
15-06-96 15:58	23	21,8								19	24,2	51	21	18	3,8	1				
15-06-96 21:32	4,2	4,0								1,8	10,2	4,1	2,6	1,9	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
16-06-96 22:57	7,2	7,3	3,5	3,3	2,1	1,8	1,8	0,9	3,2	8,1	3,8	0,7	1,9							1,5
25-06-96 14:31	1,1	1,0								5	1,3	0,3								
25-06-96 18:49	2,4	2,1								9,4	2,8	0,6	1,6							
30-06-96 18:04	3,8	5,6								1,3	0,3	0,3	12,1	7,9	1					
06-07-96 19:28	4,3	4,3										12,4	3,9	1,7	0	0	0	0	4	2,6
07-07-96 16:07	3,9	0,8								1	3,2	15,8	3,4							0
08-07-96 14:03	1,2	3,9										7,2								
10-07-96 21:51	1,8	3,8								0,6	1,2	0,2	2,3	1,1	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1
11-07-96 19:24	6	6,1								0,9	3	2,1	4,2	12,7	3,3	3,4	2,1	1,5	1,2	0,5
11-07-96 22:47	2,8	2,9								0,6	2,4	7,2	3,4	2,1	1					
14-07-96 15:53	1,2	1,1										8	1,2							
14-07-96 20:37	8,8	8,3										4,8	20,4	1,2	0,6	6	13,8	6		
14-07-96 22:55	4,3	4,1								1	3,3	8,5	2	1,7	2,4	2	2,5	3,9	0,5	
16-07-96 1:58	1	1,0										5,3	0,7							
24-07-96 23:45	1	1,0										2,5	1,8	0,5	0,7	0,5				
06-08-96 15:36	3,2	3,5								4	2,4	5	8	1,8						
07-08-96 20:29	28,1	22,7										39,6	87,8	32,4	7,4	1,2	0,4			
07-08-96 22:33	5,5	4,4								1,8	7,2	0	0,6	10,8	5,6	2,2	1,9	0,9	0,3	0
13-08-96 17:45	3,1	3,2										15	3,6							1,5
13-08-96 20:11	19,2	20,1										1,3	2,3	13,2	47,4	25,8	6,6	3,7	3,9	8,1
14-08-96 20:18	10,1	12,2								1,6	6,2	8,4	6	28	8,8	3,6				1,4
18-08-96 18:05	1,5	2,7												8,8	2,4					
18-08-96 19:27	1,2	2,1												7,2						
20-08-96 18:35	4,6	6,7										1	20	0,4	1,5	3,8	1			
21-08-96 18:14	1,5	1,5												8,3	0,7					
23-08-96 19:52	15,1	13,6										6,9	31,3	20,4	10,2	5,7	5,4	3,2	4,3	2,3
24-08-96 5:14	1	1,0										1,1	3,5	1,4						0,9
24-08-96 19:37	15,7	16,1												2,6	31,7	5,4	3,9	0,4		
			0	0	1,2	0	7,8	3,4						2,4	21,8	3				
27-08-96 22:27	4,5	5,4	136	146	156	166	176	186	196	206	216	226	236	246						
28-08-96 22:18	5,6	8,4								2,4	21,8	3								
30-08-96 20:13	15,7	14,2								0,5	20,4	1,2								
31-08-96 17:39	1,2	1,2								0,6	1,8	2,7	0,9	1,2						
31-08-96 19:55	21	20,4								3,9	3,2	21	10,8	5,4	6,3	3,7	4,7	3,2	6,5	6,1
			3	3	2,1	2,3	2,8	3,9	3,2	21	10,8	5,4	6,3	3,7	4,7	3,2	6,5	6,1	5,9	5,3
02-09-96 15:03	25,3	26,0	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142	152	162	172	182
04-09-96 1:13	5,1	1,7								4	29,3	29,1	43,8	12,9	11,9	10,3	3,3	2,5	3,5	1,2
07-09-96 18:56	8,0	4,1	1,1	1,9	1,8	1,6	1,6	3,2	4,5	5,4	2,1	1,1	0,8	0,6	0,6	1,5	1,6	0,6		
09-09-96 2:59	1,5	1,8												25,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	15,9
09-09-96 20:45	1,1	1,4								0,5	7,9	0,6								2,7
12-09-96 17:57	3,2	4,7										5,4	0,1	1,1						
13-09-96 15:28	4,7	5,3								0,1	1,1	0	0	8,2	1	2	1,3	1,4	2,1	1
13-09-96 20:51	7,2	8,2												1,8	7,9	2,8	1,3	0	2	1
18-09-96 17:56	21,8	25,4	2,9	0,9	0,3	0,3	4,1	5,5		1,8	13,2	5,5	2,8	2,5	1,2			3,8	2,8	2
27-11-96 13:55	3,5	10,4								3,7	37,7	12,5	14,8	9,3	5,1	2,6	1,1	1,1	0,7	0,8
												18,7	2,3							1,1

La figure 7.9 présente les variations de la pluviométrie annuelle dans le ranch Atotonilco en fonction de l'altitude pour l'année 1996, dont la répartition mensuelle des pluies est conforme à la moyenne (Cf. chapitre 4, paragraphe 4.2.1). Sur cette même figure, nous avons placé les pluies annuelles de la station Atotonilco correspondant aux fréquences 0,1, 0,2, 0,5, 0,8 et 0,9 (analyse statistique du chapitre 4). En utilisant le gradient pluviométrique altitudinal de l'année 1996, on peut comparer les pluies annuelles tombées sur les bassins versants aux valeurs médianes obtenues par extrapolation de l'analyse statistique des pluies annuelles réalisée pour la station Atotonilco (hacienda) sur la période 1926 à 1997. On constate ainsi que la pluviométrie de l'année 1996 (figure 7.9) est légèrement supérieure à la valeur médiane sur la plupart des bassins versants, à l'exception des bassins Oso Negro et El Molino où leur pluviométrie annuelle est inférieure à la valeur médiane, comprise entre la médiane et la quinquennale sèche, à l'exception également du bassin El Viejo où la pluviométrie annuelle est comprise entre la médiane et la quinquennale humide.

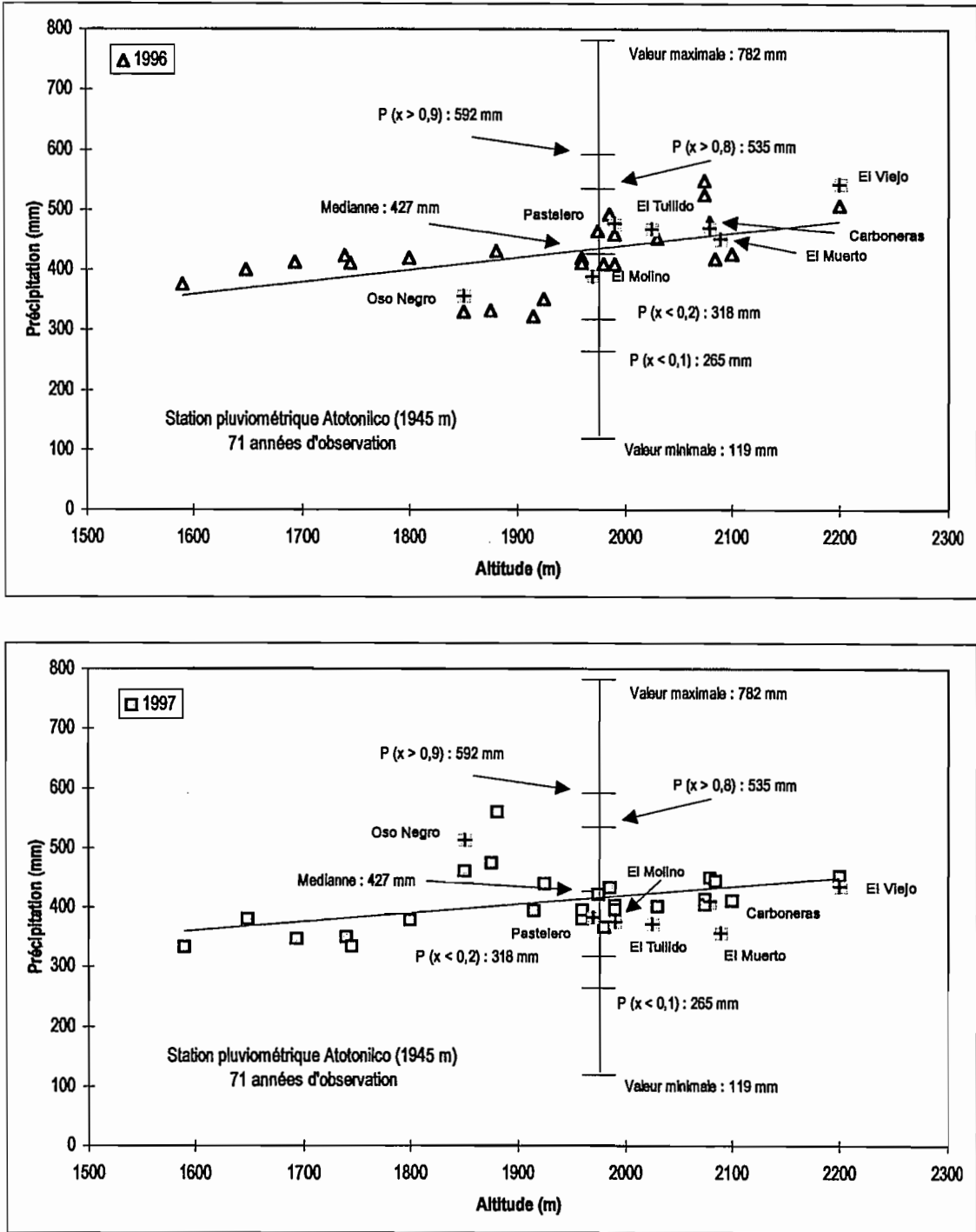


Figure 7.9. Répartition de la pluviométrie annuelle en fonction de l'altitude sur le ranch Atotonilco pour les années 1996 et 1997 en comparaison avec les valeurs caractéristiques de la série observée à la station Atotonilco sur la période 1926-1995.

Données hydrométriques à l'échelle annuelle

L'examen du tableau 7.7 montre une différence importante entre les écoulements de l'année 1996 et ceux de l'année 1997. Cette différence s'explique principalement par un pourcentage important (34 %) des pluies hivernales et printanières, celles-ci étant généralement d'un pourcentage beaucoup faible à l'échelle annuelle (de 5 à 15 %). Les pluies hivernales sont en effet de faible intensité. Elles génèrent rarement des écoulements importants. En 1997, le total pluviométrique estival est égal à 285 mm, alors que ce même total est de 467 mm en 1996. Bien que l'année 1997 ait une pluviométrie annuelle légèrement supérieure à la valeur médiane, elle apparaît donc hydrauliquement fortement déficitaire.

Tableau 7.7. Précipitations et ruissellements sur les bassins expérimentaux du ranch Atotonilco en 1996 et 1997.

Bassin versant	Superficie ha.	Lame écoulée mm		Lame précipitée mm		Coefficient d'écoulement en %	
		1996	1997	1996	1997	1996	1997
CARBONERAS	106,0	16,1	1,8	470,0	410,0	3,4	0,4
EL MUERTO	15,0	15,8	5,1	451,0	357,0	3,5	1,4
EL VIEJO	176,0	11,3	2,1	543,0	435,0	2,1	0,5
PASTELERO	168,0	12,8	1,1	477,0	376,0	2,7	0,3
EL TULLIDO	410,0	10,8	2,6	468,0	372,0	2,3	0,7
EL MOLINO	15,0	2,0	0,0	389,0	383,0	0,5	0,0
OSO NEGRO	27,0	0,0	2,1	356,0	513,0	0,0	0,4

La comparaison des écoulements montre que :

- le bassin ayant montré le plus fort coefficient d'écoulement est celui de El Muerto avec respectivement 3,5 % et 1,4 % pour les années 96 et 97;
- à l'opposé les bassins versants El Molino et Oso Negro sont les moins ruisselants avec une absence de ruissellement en 1997 et un coefficient d'écoulement très faible (0,4 %) en 1996 pour le bassin El Molino;
- les bassins El Viejo, El Tullido et El Pastelero présentent des coefficients de ruissellement très proches. (2,1 à 2,7 % en 1996 et 0,3 à 0,7 % en 1997).

Données hydrométriques à l'échelle des crues

Les données hydrométriques à l'échelle des crues sont présentées sous deux formes : sous la forme de tableaux des valeurs caractéristiques de chaque crue et sous la forme d'hydrogrammes associés aux hyétogrammes les ayant engendré. Le tableau 7.8 présente les valeurs caractéristiques des crues du bassin versant de Carboneras pour l'année 1996, déterminées selon le dessin de la figure 7.10. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Date :** le jour, le mois, l'année et l'heure du début de la crue (point A de la figure 7.10),
Type : S crue simple, D crue double, C crue complexe (plus de 2 pics),
Pm : la pluie moyenne sur le bassin versant correspondant à la crue observée,
Imax : l'intensité pluviométrique maximale en 10 minutes,
Tm : le temps de montée de la crue,
Tb : le temps de base de la crue, qui correspond à la durée du ruissellement,
Vr : le volume ruisselé pendant la crue (surface comprise entre l'hydrogramme de crue et la droite A-C sur la figure 7.10),
Kr : le coefficient de ruissellement, rapport entre le volume ruisselé et le volume pluviométrique tombé sur le bassin versant,
Qmoy : le débit moyen de crue, rapport entre le volume ruisselé et le temps de base,
Qmax : le débit maximum observé pendant la crue,
Qmax / Qmoy : le coefficient de forme de la crue.

Tableau 7.8. Valeurs caractéristiques des crues du bassin versant de Carboneras pour l'année 1996.

Superficie 106 ha	Type	Pm	I max	Tm	Tb	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
Date / Heure		mm	(10 mn)	mn	mn	m3	%	l/s	l/s	
11-7-96 20:10	S	6,1	12,7	20	40	4	0,1	2	4	2,23
11/7/96 22:50	S	2,9	7,2	20	50	9	0,3	3	6	2,19
14-7-96 22:00	D	8,3	20,4	20	100	37	0,4	6	16	2,51
7-8-96 20:30	S	22,7	87,6	20	60	4985	20,7	1385	2557	1,85
13-8-96 21:00	S	20,1	47,4	20	50	1432	6,7	477	603	1,26
14-8-96 20:10	D	12,2	26,0	30	100	161	1,2	27	53	1,96
23-8-96 19:20	C	13,6	31,3	30	90	307	2,1	57	108	1,90
24-8-96 22:40	C	16,1	31,7	30	100	190	1,1	32	33	1,05
28-8-96 22:30	C	8,4	20,4	30	150	296	3,3	33	92	2,78
30-8-96 19:30	C	14,2	32,4	60	120	735	4,9	102	180	1,76
31-8-96 20:00	C	20,4	21,0	70	180	262	1,2	24	45	1,88
2-9-96 14:50	S	26,0	43,8	40	200	2426	8,8	202	700	3,46
7/9/96 19:00	S	2,5	25,4	30	60	145	5,5	40	92	2,27
7/9/96 19:50	S	1,6	15,9	20	60	280	16,5	78	121	1,55
18-9-96 18:50	C	25,4	37,7	30	180	400	1,5	37	108	2,93

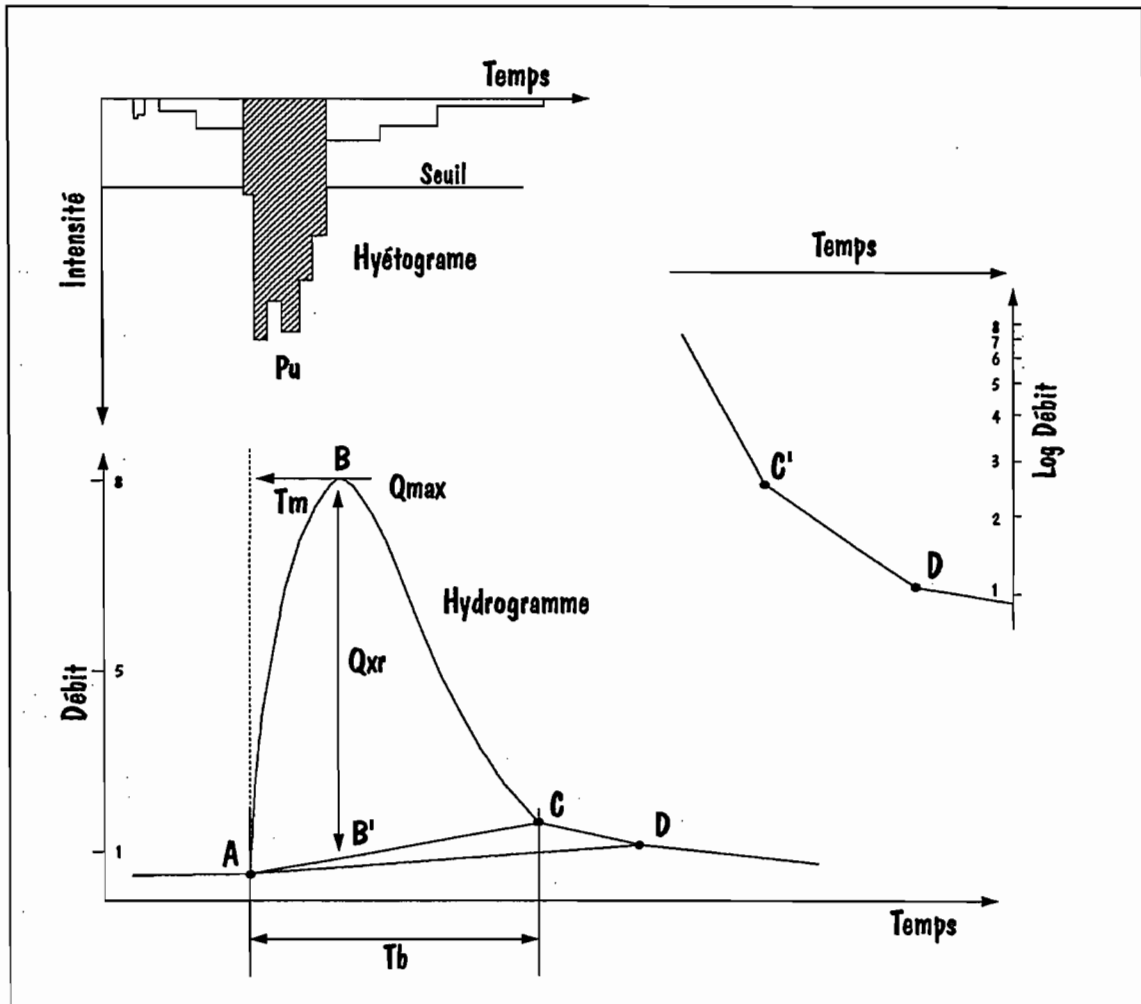


Figure 7.10. Représentation graphique des caractéristiques de la pluie et de la crue à tendance unitaire (FAO 1996).

Pour la plupart des crues observées sur les bassins versants du ranch Atotonilco, les débits de base en fin de crue sont nuls. Cependant, il est difficile de les estimer avec précision lorsque les barrages déversent. En effet, le débit déversé en fin de crue est alors nettement supérieur au débit entrant, de telle sorte qu'il est pratiquement impossible d'estimer avec précision ce dernier. En les groupant par bassin versant et par année, nous avons rassemblé en l'annexe VII.5.1 et VII.5.2 les tableaux des caractéristiques des crues des années 1996 et 1997 et, aux annexes VII.6.1 à VII.6.4, les hydrogrammes et les hyétogrammes des quelques crues types dans l'ordre chronologique de leur occurrence.

7.3. Conclusion

Les résultats obtenus sur les bassins versants montrent que l'année 1996 est pluviométriquement et hydrauliquement excédentaire. Avec une pluie annuelle de 480 mm, sa période de retour est de 4 ans à la station Atotonilco. Elle présente en moyenne, à l'exception des bassins Oso Negro et El Molino, 14 écoulements pour 58 événements pluvieux enregistrés. Pour les mêmes bassins versants en 1997, dont la pluviométrie annuelle est proche de la valeur médiane à la station Atotonilco (430 mm), le nombre moyen d'écoulements est seulement de 3 à 4 pour 65 événements pluvieux supérieurs à 1 mm. La raison essentielle de ce déficit d'écoulement est l'importance prise par les petites pluies hivernales et printanières qui forment à elles seules, en 1997, 34 % de la pluviométrie annuelle. Le bassin versant Oso Negro n'a pas coulé en 1996. Un très faible écoulement a été observé sur le bassin versant El Molino.

En 1996, les coefficients annuels d'écoulement sont plus importants (3,4 à 2,7 %) sur les bassins versants calcaires : Carboneras, El Muerto et Pastelero dans sa partie amont. Leurs coefficients maximums de ruissellement sont égaux à 17 % pour Carboneras, 18 % pour El Muerto et 13 % pour Pastelero.

Les bassins versants rhyolitiques, El Viejo et El Tullido ont des coefficients d'écoulement plus faibles que les bassins versants calcaires : respectivement 2,1 et 2,3 % à l'échelle annuelle, 10 et 14 % pour les maximums.

Les bassins versants sur basalte et conglomérat basaltique, El Molino et Oso Negro, ne ruissellent pas ou peu et présentent respectivement des coefficients d'écoulement annuel de 0,5 et 0,0 % en 1996.

Pour les 8 parcelles représentatives de deux situations de pente, de trois types de couverts végétaux et de deux lithologies, les résultats se rapportent exclusivement à l'année 1996. A l'échelle annuelle, les résultats sont très contrastés, avec des coefficients de ruissellement plus faibles en position de piémont (6 à 16 %) qu'en position de haut glacis (14 à 23 %).

Sur le versant calcaire, la teneur en carbonate de calcium des éléments fins du sol (taille inférieure à 2 mm) semble expliquer la plus ou moins grande aptitude des sols au ruissellement :

	Teneur en CaCO_3 %	Coefficient annuel de ruissellement (%)
Parcelle 6	15	21
Parcelle 5	08	16
Parcelle 2	01	11
Parcelle 1	01	08

Sur le versant rhyolitique, la teneur du sol en carbone total semble le paramètre déterminant, le couvert végétal pour les parcelles 3 et 4 ou le refus à 2 mm pour les parcelles 7 et 8 ayant un rôle important mais secondaire :

	Teneur en Carbone total %	Refus à 2 mm %	Refus Coefficient annuel de ruissellement (%)
Parcelle 7	15	60	23
Parcelle 8	08	38	14
	Couvert végétal %		
Parcelle 3	01	28	16
Parcelle 4	01	80	06

Les coefficients maximaux de ruissellement peuvent être très élevés sur les parcelles :

- 60 à 70 % sur les parcelles 6, 7 et 8 qui sont caractérisées respectivement par une teneur des sols élevée en CaCO_3 , une très forte pierrosité et un très faible couvert végétal;
- 40 à 60 % sur les parcelles 3 et 5; caractérisées respectivement par un couvert végétal très faible et une teneur en CaCO_3 assez forte;
- 20 à 40 % sur les parcelles 1, 2 et 4 respectivement pour les deux premières par une faible teneur en CaCO_3 et pour la troisième par une teneur en carbone élevée et un très fort couvert végétal.

Afin d'expliquer, de modéliser et d'extrapoler le comportement hydrologique des petits bassins versants dans le ranch Atotonilco, nous tenterons, dans le chapitre suivant, de préciser, par une analyse en composantes principales, les relations entre les paramètres de l'écoulement et les variables descriptives des parcelles expérimentales et des bassins versants.

Les petits barrages et leurs équipements

Le presón El Viejo et son équipement hydrométrique



Le presón Carboneras, pluviomètre et bac classe A

Le presón Pastelero, cuvette après surcreusement



Le presón San Marcos en basses eaux (cuvette à fond plat et de grande superficie)

**Système de distribution
de l'eau dans le ranch**

Moteur diesel



Réseau d'alimentation

Réservoir placé sur une butte
(Coronela)

Abreuvoir en
aval du réservoir



Eolienne "Papalote"



Réservoir placé aux limites de 4
enclos avec fonction d'abreuvoir



**Différents types de
couverture végétale**

Pâturages et buissons sur
colluvions et alluvions de
bas versant



Taureau de race Herford

Matorral bas buissonnant
sur colluvions à mi-versant



Cactacées et buissons sur
versant basaltique

**Infrastructures
du ranch**

Portail d'entrée



Piste principale et clôtures



Zone d'embarquement



TROISIEME PARTIE

ALIMENTATION EN EAU DES PETITES RETENUES

CHAPITRE 8 : Modélisation de la lame ruisselée

CHAPITRE 9 : Analyse spatiale des données hydrologiques

CHAPITRE 10 : Validation, transposition et simulation

CHAPITRE 8

MODELISATION DE LA LAME RUISSELEE

Ce chapitre a pour but d'identifier et de hiérarchiser les facteurs pluviométriques qui influencent le ruissellement superficiel dans le ranch Atotonilco afin d'établir des relations, aussi précises que possible, entre les précipitations et le ruissellement à l'échelle des parcelles et des bassins versants. Pour ce faire nous utiliserons les données pluviométriques et hydrométriques collectées au cours de l'année 1996. A l'échelle des parcelles ce sont actuellement les seules données disponibles. A l'échelle des bassins versants, les observations de l'année 1996 serviront au calage des modèles, les années 1997 et 1998 à leur validation.

Les facteurs pluviométriques interviennent sur la variabilité temporelle de l'écoulement en fonction de l'abondance des pluies et de la fréquence des événements. L'abondance de la pluie est bien représentée par son intensité mais celle-ci varie en fonction du temps au sein d'une même averse et nous avons vu, au chapitre 6 avec l'analyse des hyétogrammes, que la répartition des intensités varie d'une averse à l'autre, d'une saison à l'autre. Nous chercherons donc à définir une même variable pluviométrique susceptible d'intégrer l'intensité de la pluie pour toutes les averses. La fréquence des événements pluvieux joue un rôle important dans le taux d'humectation des sols et, en général, plus le sol est humide, plus grande est sa capacité de ruissellement. Pour expliquer les relations pluies - ruissellements nous essaierons donc de faire intervenir la succession des événements pluvieux en calculant un indice d'humectation des sols (IK) tenant compte à la fois des pluies antérieures et de la vitesse de décroissance de l'humidité des sols.

Pour identifier les variables pluviométriques explicatives de l'écoulement et déterminer les valeurs des paramètres qui leur sont associés, nous avons utilisé les régressions linéaires simple.

Pour modéliser le ruissellement, nous commencerons par utiliser des modèles basés sur les régressions linéaires multiples. Nous utiliserons ensuite les relations linéaires inspirées des travaux de Girard (1975) puis un modèle quadratique permettant de respecter la forme de la relation entre la lame ruisselée et la pluie. Pour comparer la qualité des ajustements, nous utiliserons comme critère la somme des carrés des écarts entre les valeurs de la lame ruisselée observée et les valeurs estimées de cette même lame. Ce critère ne permet pas de comparer la qualité des ajustements d'une parcelle à l'autre ou d'un bassin à l'autre mais il permet, pour un même échantillon, de comparer l'ajustement des différents modèles.

8.1. Variabilité temporelle de l'écoulement superficiel

8.1.1. Sur parcelles expérimentales

Pour l'année 1996, nous avons reporté sur les tableaux 8.1 et 8.2 l'ensemble des données pluviométriques (colonnes 1 à 3) et hydrométriques (colonne de la lame ruisselée, L_r) collectées sur les parcelles expérimentales, y compris les événements pluviométriques n'ayant pas produit de ruissellement. Le tableau 8.1 concerne les quatre parcelles expérimentales du bassin versant rhyolitique de El Viejo, numérotées 3, 4, 7 et 8. Le tableau 8.2 concerne les quatre parcelles expérimentales du bassin versant calcaire de Carboneras, numérotées 1, 2, 5 et 6. En prenant comme exemple la parcelle expérimentale 1 (bassin versant Carboneras), nous allons tenter d'identifier les principales variables explicatives du ruissellement.

A l'échelle saisonnière

Nous avons reporté sur la figure 8.1, les lames ruisselées cumulées en fonction des pluies efficaces cumulées, c'est à dire des cumuls pluviométriques ayant engendré des écoulements. La pente de cette courbe, entre deux événements, représente le coefficient de ruissellement de la parcelle. Pour la parcelle 1, comme pour les autres parcelles du bassin versant de Carboneras, l'examen de ce graphique permet de conclure à une certaine variabilité du coefficient de ruissellement au cours de la saison des pluies (juin à septembre). Ce coefficient varie de 2 % à plus de 50 % (annexe VII.1.1). A l'exception de la crue du 30 août, sa valeur apparaît nettement plus faible (12 % en moyenne) entre le 14 et 30 août. Trois événements (7/8, 30/8 et 2/9) fournissent environ 45 % de l'écoulement annuel pour une pluviométrie totalisant seulement 69 mm soit 15 % de la pluie annuelle (465 mm); ces événements correspondent à des averses à intensités en 10 minutes moyennes à fortes : respectivement 87, 32 et 44 mm/h. Cette grande variabilité temporelle du coefficient de ruissellement nous amène à une analyse plus poussée des relations entre les lames ruisselées et les pluies à l'échelle de l'averse.

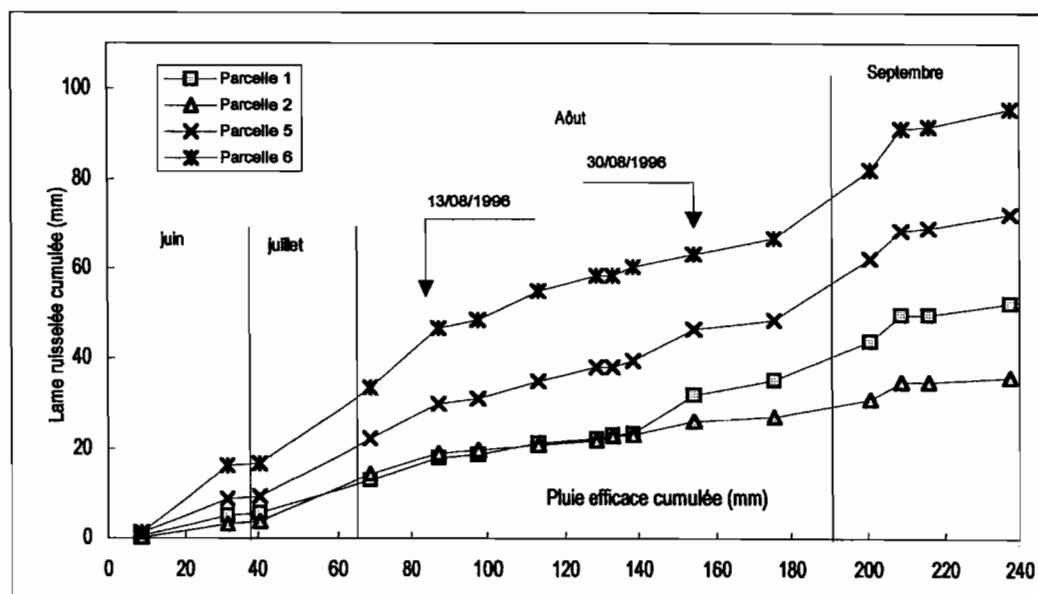


Figure 8.1. Lames ruisselées cumulées en fonction des précipitations efficaces cumulées sur les parcelles expérimentales du bassin versant de Carboneras.

Tableau 8.1. Données pluviométriques et hydrométriques collectées sur les parcelles expérimentales de El Viejo.

DATE / HEURE	PLUIE	DUREE	Intensité de pluie limite du ruissellement (IL), pluie utile (PUIL), lame ruisselée (Lr)												INDICE	INTENSITE DE PLUIE EN				
EL VIEJO			Parcelle 3			Parcelle 4			Parcelle 7			Parcelle 8			IK	5 mn	10 mn	15 mn	30 mn	
	mm	mn	IL	PUIL	Lr	IL	PUIL	Lr	IL	PUIL	Lr	IL	PUIL	Lr						
21-05-96 14:31	1,5	23													0,0	12,0	7,2	5,2	3,0	
31-05-96 19:04	5,5	25													0,5	30,0	21,6	17,2	11,0	
12-06-96 15:56	6,0	26													1,8	33,6	27,6	19,6	12,0	
12-06-96 22:04	1,0	12													7,6	4,8	4,8	4,0	2,0	
15-06-96 15:39	9,0	68													6,6	24,0	21,0	17,2	12,2	
15-06-96 21:16	2,5	46													15,2	7,2	6,0	5,6	3,8	
16-06-96 22:58	11,5	152													15,9	8,4	7,2	6,8	6,2	
25-06-96 13:42	3,0	55													11,6	7,2	6,6	6,0	5,0	
25-06-96 18:33	3,5	101													14,3	9,6	7,2	6,4	4,2	
26-06-96 03:48	2,0	51													17,1	2,4	2,4	2,8	2,4	
26-06-96 20:27	1,5	67													17,8	1,2	1,8	1,6	1,4	
30-06-96 18:01	2,0	36													13,1	7,2	5,4	4,4	3,6	
30-06-96 20:19	5,0	84	-	-	0,11	-	-	0,05	-	-	0,32	-	-	0,35	15,0	15,6	10,8	8,4	5,2	
05-07-96 19:50	2,5	14													12,1	18,0	11,4	10,0	5,0	
06-07-96 21:32	1,0	5													13,1	12,0	6,0	4,0	2,0	
07-07-96 18:18	2,0	6													13,1	21,6	12,0	8,0	4,0	
09-07-96 16:37	2,0	8													12,3	16,8	12,0	8,0	4,0	
10-07-96 21:32	4,5	128													12,7	6,0	6,0	5,6	4,6	
11-07-96 00:56	1,0	56													17,0	1,2	1,2	1,2	1,0	
11-07-96 19:09	47,5	117			-			-			-			-	16,6	114,0	108,0	104,0	75,0	
11-07-96 22:41	2,0	59													63,2	3,6	3,0	2,8	2,4	
14-07-96 20:15	13,0	211	14,15	3,96	0,25	15,18	3,70	0,02	13,82	4,09	0,42	14,15	3,96	0,35	48,8	30,0	22,8	17,6	12,2	
23-07-96 20:08	1,0	50													25,1	1,2	1,2	1,2	1,2	
01-08-96 21:47	7,0	61													10,6	32,4	30,0	20,8	12,2	
05-08-96 00:29	1,0	16													12,9	3,6	3,6	3,6	2,0	
06-08-96 00:01	1,0	21													12,6	2,4	3,0	2,8	2,0	
07-08-96 20:19	23,0	40	29,86	17,11	4,82	31,44	15,92	2,00	26,36	18,50	6,57	29,86	17,11	4,60	11,3	114,0	90,0	72,0	43,4	
07-08-96 22:12	8,0	88													34,0	18,0	13,8	11,2	8,4	
13-08-96 18:40	27,5	162	23,48	15,00	6,05	24,88	15,00	1,79	21,41	15,00	6,03	23,48	15,00	4,84	23,4	90,0	69,0	49,6	29,2	
14-08-96 19:57	22,5	42	-	-	7,00	-	-	2,69	-	-	9,04	-	-	7,26	45,9	78,0	63,0	56,0	40,4	
18-08-96 23:45	1,0	15													45,1	3,6	4,2	4,0	2,0	
20-08-96 18:25	31,0	58	17,33	28,50	10,70	18,50	28,50	4,05	16,47	28,50	15,57	17,33	28,50	11,62	38,6	60,0	60,0	54,0	42,4	
23-08-96 19:03	18,5	128	13,43	11,50	4,37	14,44	10,96	0,64	13,22	11,50	6,91	13,43	11,50	4,08	51,4	42,0	27,0	24,8	18,0	
24-08-96 19:29	17,0	241	10,64	7,02	1,17	11,50	6,38	0,08	10,80	6,90	4,16	10,64	7,02	2,20	63,1	20,4	16,2	15,2	12,6	
28-08-96 17:47	1,0	10													54,1	8,0	6,0	4,0	2,0	
28-08-96 22:19	6,0	23	12,74	5,00	0,06	13,71	5,00	0,05	12,63	5,00	0,93	12,74	5,00	0,19	54,1	24,0	19,8	18,0	12,0	
29-08-96 00:48	1,0	8													58,5	7,2	6,0	4,0	2,0	
29-08-96 17:46	2,0	17													56,3	9,6	7,8	7,2	4,0	
30-08-96 20:03	8,0	138	13,20	2,00	0,94	14,19	1,85	0,48	13,02	2,10	1,14	13,20	4,00	1,58	52,3	18,0	15,0	12,8	9,2	
31-08-96 18:27	9,0	131													56,4	27,6	22,8	18,0	9,8	
31-08-96 20:57	18,5	239	10,63	3,40	0,00	11,49	1,89	0,00	10,80	3,11	0,63	10,63	3,40	0,15	63,2	12,0	10,8	9,6	7,8	
02-09-96 14:32	17,5	61	9,53	16,00	6,68	10,33	15,92	2,56	9,82	16,00	10,28	9,53	16,00	7,08	68,7	66,0	49,8	41,2	30,4	
03-09-96 18:21	9,0	98	8,05	6,00	1,26	8,77	4,00	0,00	8,49	6,00	3,86	8,05	6,00	1,34	77,1	30,0	21,6	16,4	8,8	
04-09-96 01:30	5,0	150													63,3	6,0	4,8	4,0	3,8	
07-09-96 14:03	4,5	24	10,88	2,78	0,54	11,75	2,56	0,00	11,02	2,75	0,93	10,88	2,78	0,15	62,0	12,0	11,4	11,2	9,0	
07-09-96 18:39	1,5	29													65,2	3,6	3,0	3,2	3,0	
12-09-96 17:41	9,0	100	16,64	4,50	1,18	-	-	0,43	15,91	4,50	1,97	16,64	4,50	0,70	40,6	37,2	20,4	14,8	8,8	
13-09-96 15:25	1,5	7													46,3	13,2	9,0	6,0	3,0	
13-09-96 20:10	12,5	94	15,01	4,23	2,68	-	-	0,51	14,55	5,04	3,30	15,01	4,23	2,52	45,8	18,0	18,0	16,0	11,2	
18-09-96 17:40	15,0	186	18,35	4,50	1,41	19,57	4,50	0,20	-	-	2,62	18,35	4,50	0,62	35,7	30,0	25,8	21,2	13,6	
20-09-96 16:37	1,0	40													41,8	1,2	1,8	1,6	1,6	
25-09-96 22:50	14,5	33	22,56	12,22	3,75	23,92	11,54	1,34	20,68	13,16	6,12	22,56	12,00	3,90	25,4	42,0	36,0	36,0	28,0	
03-10-96 04:33	14,0	201													19,3	12,6	12,6	11,2	9,1	
03-10-96 16:47	82,3	1581													31,6	25,2	18,9	18,2	15,4	
04-10-96 23:44	7,0	101													100,1	8,4	10,5	9,8	7,7	
27-11-96 17:55	1,5	40													0,5	4,8	4,2	3,2	2,6	
28-11-96 00:44	3,5	96													1,9	4,8	3,6	3,2	3,0	
28-11-96 04:01	8,5	133													5,4	9,6	9,0	7,6	6,6	

Tableau 8.2. Données pluviométriques et hydrométriques collectées sur les parcelles expérimentales de Carboneras.

DATE / HEURE	PLUIE	DUREE	IL	PUIL	Lame ruisselée (Lr)				INDICE	INTENSITE DE PLUIE EN			
CARBONERAS	mm	mn	mm/h	mm	PARCELLES				IK				
					1	2	5	6		5 mn	10 mn	15 mn	30 mn
					mm	mm	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h
29-06-96 21:15	1,3	41							0,0	3,6	3,0	2,8	2,0
01-06-96 18:53	8,6	8	25,74	8,60	0,57	0,10	1,35	1,34	1,0	64,8	51,6	34,4	17,2
12-06-96 16:08	1,9	23							3,2	10,8	7,8	6,8	3,8
12-06-96 22:02	1,0	28							5,0	7,2	4,2	2,8	2,0
13-06-96 20:39	4,8	24							5,5	31,2	22,8	17,2	9,6
15-06-96 15:58	23,0	59	22,32	17,49	4,41	2,97	7,28	1,39	8,6	84,0	51,0	42,4	36,2
15-06-96 21:32	4,2	128							30,8	10,8	10,2	8,4	5,8
16-06-96 22:57	7,2	141							31,5	9,6	8,4	7,6	5,0
25-06-96 14:31	1,1	23							16,3	7,2	4,8	4,0	2,2
25-06-96 18:49	2,4	38							17,1	12,0	9,6	7,6	4,2
30-06-96 18:04	3,8	52							11,9	19,2	12,0	11,2	7,0
06-07-96 19:28	4,3	155							6,5	16,8	12,6	10,0	6,0
07-07-96 16:07	3,9	30							11,8	15,6	15,6	12,8	7,8
08-07-96 14:03	1,2	10							14,3	9,6	7,2	4,8	2,4
10-07-96 21:51	1,8	106							12,3	2,4	2,4	2,0	1,4
11-07-96 19:24	6,0	110							12,9	14,4	12,6	10,8	6,8
11-07-96 23:07	2,8	51							18,6	8,4	7,2	6,0	4,6
14-07-96 15:53	1,2	13							16,3	7,2	6,0	4,8	2,4
14-07-96 20:37	8,8	54	18,98	8,00	0,54	0,65	0,66	0,42	17,2	24,0	20,4	17,2	8,8
14-07-96 22:55	4,3	90							25,7	8,4	6,6	5,6	4,0
16-07-96 01:58	1,0	12							26,8	6,0	5,4	4,0	2,0
24-07-96 23:45	1,0	43							11,4	2,4	2,4	2,4	1,6
06-08-96 15:36	3,2	45							3,5	7,2	6,0	6,0	4,8
07-08-96 20:29	28,1	53	23,44	24,75	7,50	10,68	12,91	16,80	5,9	122,4	87,6	87,6	53,6
07-08-96 22:33	5,5	137							33,8	15,6	10,8	9,2	6,2
13-08-96 17:45	3,1	18							22,0	15,6	15,0	11,6	6,2
13-08-96 20:11	19,2	103	16,44	12,50	4,93	4,55	7,76	10,00	24,8	64,8	47,4	45,6	29,0
14-08-96 14:34	1,2	8							40,8	9,6	7,2	4,8	2,4
14-08-96 20:18	10,1	60	12,13	7,10	0,74	0,68	1,16	1,95	41,0	39,6	25,8	20,8	14,6
18-08-96 18:05	1,5	17							34,6	9,6	6,6	5,6	3,0
18-08-96 19:27	1,2	10							35,9	9,6	7,2	4,8	2,4
20-08-96 18:35	4,6	49							30,4	22,8	19,8	14,0	7,4
21-08-96 18:14	1,5	14							31,8	12,0	8,4	6,0	3,0
23-08-96 19:52	15,1	92	15,77	10,10	2,52	1,19	3,77	6,36	27,0	31,2	31,2	30,0	22,4
24-08-96 05:14	1,0	17							40,5	3,6	3,6	3,6	2,0
24-08-96 19:37	15,7	237	12,57	6,53	1,03	1,00	3,13	3,41	39,1	50,4	31,8	23,6	14,0
27-08-96 22:27	4,5	21			0,83	1,02	0,10	0,10	40,1	34,8	21,6	16,4	9,0
28-08-96 22:18	5,6	36	12,26	4,29	0,28	0,21	1,46	1,95	40,4	24,0	20,4	14,4	10,0
30-08-96 20:13	15,7	50	12,83	13,87	8,49	3,3	6,98	6,89	38,0	42,0	32,4	28,8	23,4
31-08-96 17:39	1,2	42							49,1	2,4	3,0	2,4	2,0
31-08-96 19:55	21,0	279	-	-	-	-	-	-	49,9	21,6	21,0	17,2	12,4
02-09-96 15:03	25,3	98	8,62	23,70	8,55	3,86	13,66	15,26	59,2	46,8	43,8	41,2	34,0
04-09-96 01:13	5,1	159							73,3	6,0	5,4	5,2	4,4
07-09-96 18:56	8,0	74	-	-	-	-	-	-	53,9	31,8	25,4	17,0	8,5
09-09-96 02:59	1,5	18							49,7	10,8	7,8	6,0	3,0
09-09-96 20:45	1,1	28							47,6	8,4	5,4	3,6	2,2
12-09-96 17:57	3,2	97							36,5	16,8	9,0	6,4	4,0
13-09-96 15:28	4,7	126							36,3	9,6	7,8	7,2	4,2
13-09-96 20:51	7,2	126	11,72	2,10	0,13	0,05	0,57	0,52	40,1	15,6	13,2	10,8	7,2
18-09-96 17:58	21,8	267	14,72	9,40	2,50	1,05	3,23	3,91	29,0	38,4	37,8	32,8	22,2
02-10-96 18:16	1,2	55							12,5	4,8	3,6	3,2	2,0
03-10-96 01:02	2,2	112							13,3	2,4	2,4	2,0	1,8
03-10-96 04:55	8,1	262							15,3	3,6	3,0	3,2	3,0
03-10-96 12:41	69,5	1831	-	-	-	-	-	-	22,6	9,6	9,6	9,2	8,0
04-10-96 23:39	11,7	539							79,6	6,0	6,0	5,6	4,8
27-11-96 13:55	3,5	11							0,4	22,8	18,6	14,0	7,0
27-11-96 19:56	1,7	7							3,8	18,0	10,2	6,8	3,4

Pour des averses avec ruissellement

A l'échelle des averses ayant produit un ruissellement, il nous faut considérer deux facteurs principaux : l'intensité des pluies d'une part, la fréquence des événements d'autre part. Sur les tableaux 8.1 et 8.2 nous avons placé deux facteurs qui nous paraissent fondamentaux pour expliquer la variabilité du ruissellement : l'intensité de la pluie à différents pas de temps (5 à 180 minutes) et l'indice d'antériorité des pluies (IK) qui tient compte à la fois de la fréquence des pluies et de la durée qui sépare deux averses successives, cet indice est défini de la façon suivante :

$$IK_t = (IK_{t-\Delta t} + P_{t-\Delta t}) \text{EXP}(-\alpha \Delta t)$$

- où IK_t est l'indice de Kohler à l'instant t ,
 $P_{t-\Delta t}$ est la pluie antérieure, tombée juste avant l'instant $t-\Delta t$,
 Δt est l'intervalle de temps entre deux pluies successives,
 α est un coefficient qui règle la décroissance de l'indice en fonction du temps.

Pour déterminer la valeur du coefficient α , nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les lames ruisselées et l'indice de Kohler pour différentes valeurs de α . Les résultats de ces calculs sont présentés sur les tableaux 8.3 pour les parcelles du bassin El Viejo.

Tableau 8.3. Coefficients de corrélation linéaire simple entre lames ruisselées sur les parcelles expérimentales du bassin El Viejo et différents indices de Kohler ($\alpha = 0,1$ à $0,7$).

	Coefficients réglant la décroissance de l'indice IK d'antériorité des pluies						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Parcelle 3	-0,23	-0,14	-0,11	-0,09	-0,08	-0,08	-0,07
Parcelle 4	-0,27	-0,18	-0,14	-0,12	-0,10	-0,09	-0,08
Parcelle 7	-0,10	-0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Parcelle 8	-0,16	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,00

L'examen du tableau 8.3 permet de constater que, malgré la faiblesse des coefficients de corrélation négative (-0,27 à -0,10), les valeurs les plus élevées correspondent à la valeur $\alpha = 0,1$. L'observation des données permet de vérifier que la corrélation négative est due à de forts événements pluvieux au début de la saison de pluie, quand les valeurs de IK sont faibles. Il est donc difficile de justifier le choix d'une valeur de α par des corrélations entre la lame ruisselée et IK. Nous prendrons néanmoins la valeur $\alpha = 0,1$ pour calculer l'indice de Kohler qui nous servira d'indice d'humectation des sols pour le calcul des seuils d'intensité de pluie limites du ruissellement. Par ailleurs, l'observation de la décroissance de la humidité des horizons superficiels des sols en fonction du temps, après le 10 octobre 1996, (figure 7.4 et l'annexe VII.1.2) montre qu'elle est inférieure à la décroissance de IK pour $\alpha = 0,1$. On peut donc penser que la valeur $\alpha = 0,1$ convient mieux que des valeurs plus fortes (0,2 ou 0,3) pour calculer un indice d'humectation des sols sensé représenter l'évolution de leur humidité.

Dans le cas des parcelles expérimentales des bassins Carboneras et El Viejo, compte tenu de la faiblesse des corrélations, l'indice d'humectation ne semble pas intervenir directement pour

expliquer le ruissellement. On observe cependant sur l'annexe VII.1.1 quelques événements aux coefficients de ruissellement particulièrement élevés pour des valeurs de IK très fortes (2/09/1996 avec $IK = 70$ mm pour $\alpha = 0,1$ sur les parcelles de El Viejo) ou pour des intensités pluviométriques très élevées (7/08/1996 avec une intensité maximale de 90 mm/h en 10 mn sur les parcelles de El Viejo).

Nous avons effectué les mêmes calculs de corrélation entre les lames ruisselées et les intensités de pluie pour des intensités maximales mesurées sur des pas de temps allant de 5 à 90 minutes. Les résultats de ces calculs sont présentés sur le tableau 8.4 pour les parcelles du bassin Carboneras.

Tableau 8.4. Coefficients de corrélation linéaire simple entre lames ruisselées sur les parcelles expérimentales du bassin Carboneras et les intensités maximales de pluies sur le pas de temps de 5 à 90 minutes.

Pas de temps en mn	5	10	15	30	45	60	90
Parcelle 1	0,53	0,61	0,68	0,80	0,85	0,85	0,86
Parcelle 2	0,83	0,85	0,94	0,91	0,86	0,85	0,83
Parcelle 5	0,67	0,74	0,81	0,90	0,92	0,93	0,94
Parcelle 6	0,74	0,78	0,84	0,95	0,97	0,97	0,97

On constate que le coefficient de corrélation entre lames ruisselées et intensités de pluie croît jusqu'aux intensités correspondant à des pas temps de 30 minutes. Pour des durées plus longues, supérieures à 45 minutes, l'amélioration n'apparaît pas significative. Pour une durée de 30 minutes, le coefficient de corrélation varie entre 0,80 et 0,95 suivant les parcelles. Cette forte corrélation s'explique assez bien en considérant la structure des averses (chapitre 6, tableau 6.3) : en moyenne, plus de 70% du total de la pluie tombe en effet durant les 30 minutes pendant lesquelles la pluie est la plus intense.

Pour les averses sans ruissellement

L'examen des tableaux 8.1 et 8.2 montre qu'une bonne partie des événements pluvieux (environ 80 %) ne produisent aucun ruissellement, soit en raison de la faible valeur du total pluviométrique, soit en raison de la faiblesse de l'intensité de la pluie. Il nous est donc apparu intéressant de mettre en relation l'intensité maximale de l'averse et l'indice d'antériorité des pluies ou indice de Kohler pour les événements pluvieux n'ayant produit aucun ruissellement.

En prenant comme exemple la parcelle n° 1 du bassin versant de Carboneras, nous avons porté sur la figure 8.2 les intensités maximales de pluie, au pas de temps de 10 minutes, en fonction de l'indice de Kohler pour la valeur 0,1 de α (IK1). Le choix du pas de temps de 10 minutes à l'échelle des parcelles se justifie à la fois par la valeur du temps de concentration des crues, inférieure à 5 minutes, et par la précision du dépouillement des diagrammes pluviographiques.

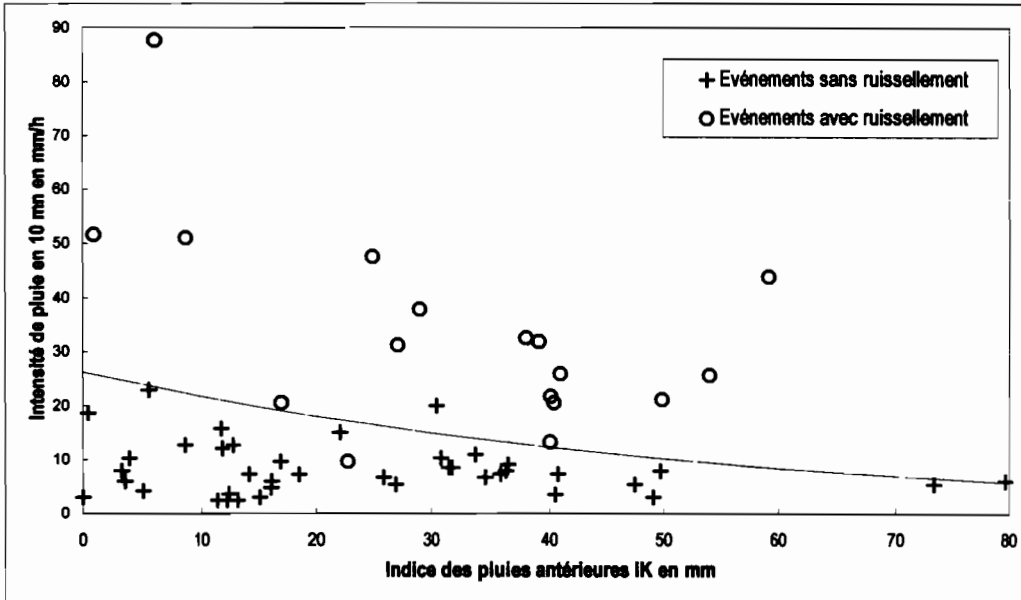


Figure 8.2. Intensités pluviométriques en 10 minutes en fonction de l'indice de Kohler ($\alpha=0,1$) pour les averses avec et sans écoulement sur la parcelle 1 (Carboneras).

La figure 8.2 montre que plus l'indice de Kohler est faible, plus l'intensité maximale en 10 mn doit être forte pour produire un ruissellement. En ajoutant sur cette figure les événements ayant produit les écoulements les plus faibles et en distinguant ces événements des autres par un symbole différent, le plan se trouve séparé en deux domaines distincts limités par une courbe à décroissance exponentielle. Cette courbe représente la frontière entre les averses avec ruissellement et les averses sans ruissellement. On peut constater également que pour des valeurs fortes de IK_1 , l'intensité de pluie nécessaire au ruissellement ne dépasse pas 5 à 6 mm/h. Par contre, pour un IK_1 égal à zéro, l'intensité de pluie doit être supérieure à 25 mm/h pour produire un écoulement. Ainsi se trouve définie l'intensité de pluie limite de ruissellement (IL). Pour la parcelle expérimentale n°1 du bassin versant de Carboneras, la relation entre IL et IK_1 est de la forme :

$$IL = 26,2 \cdot e^{-0,019 \cdot IK_1}$$

En définitive, l'intensité de pluie limite du ruissellement correspond à la capacité d'infiltration du sol, laquelle dépend de son état d'humectation.

Pour une averse donnée, connaissant l'intensité de pluie limite du ruissellement en début d'averse (IL), que l'on calcule à partir de l'équation ci-dessus après détermination de IK_1 , on peut donc définir la pluie susceptible d'engendrer un écoulement comme la somme des pluies dont l'intensité (IP) dépasse la valeur limite IL . Nous appellerons pluie utile ($PUIL$) cette fraction du total pluviométrique. La formulation mathématique de la pluie utile est la suivante :

$$PUIL_n = \sum_i (IP_i \times \Delta t_i) \text{ pour } IP_i > IL_n$$

où IP_i est l'intensité de la pluie durant l'intervalle de temps Δt_i de l'averse n ,

IL_n est l'intensité de pluie limite de ruissellement au début de l'averse n , considérée comme constante durant toute la durée de l'averse.

Pour tester l'intérêt de cette nouvelle variable explicative, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les lames ruisselées sur les parcelles, la pluie totale de l'averse, la pluie utile à seuil variable (PUIL) et différentes pluies utiles à seuil constant de 5, 6, 10, 28 et 32 mm/h. Les résultats de ces calculs pour les parcelles du bassin versant Carboneras sont reportés sur le tableau 8.5. La comparaison des coefficients de corrélation montre la supériorité de la pluie utile à seuil variable (PUIL) par rapport à la pluie totale de l'averse ou par rapport aux pluies utiles à seuil constant (5 à 32 mm/h).

Tableau 8.5. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les lames ruisselées sur les parcelles expérimentales du bassin Carboneras, la pluie utile pour différents seuils d'intensité et la pluie totale.

	Seuils d'intensité de pluie en mm/h					Pluie totale	PUIL
	5	6	10	28	32		
Parcelle 1	0,84	0,85	0,85	0,84	0,74	0,79	0,89
Parcelle 2	0,81	0,84	0,83	0,88	0,86	0,76	0,82
Parcelle 5	0,92	0,94	0,93	0,89	0,77	0,89	0,97
Parcelle 6	0,94	0,96	0,97	0,91	0,79	0,91	0,96

8.1.2. A l'exutoire des bassins versants

Les annexes VIII.1 à VIII.5 présentent les données pluviométriques et hydrométriques des bassins versants de Carboneras, El Muerto, El Tullido, Pastelero et El Viejo. Pour le bassin El Molino, les petits apports observés dans la retenue (2 mm de lame ruisselée en 1996) proviennent exclusivement de la cuvette de la retenue et de ses abords. Pour celui d'Oso Negro, une seule crue a été observée le 28 juin 1996 pour une pluie journalière de 86 mm, dont nous ne possédons malheureusement pas l'enregistrement pluviographique.

A l'échelle saisonnière

Nous avons reporté sur la figure 8.3, pour l'année 1996, les lames ruisselées cumulées observées sur les bassins versants expérimentaux en fonction des pluies efficaces cumulées, c'est à dire des cumuls pluviométriques ayant engendré des écoulements. La pente de cette courbe, entre deux événements représente le coefficient de ruissellement du bassin. L'examen des différentes courbes permet de conclure à une certaine variabilité du coefficient de ruissellement au cours de la saison des pluies. Pour le bassin de Carboneras, ce coefficient, égal à 3,5 % à l'échelle saisonnière, varie de 0,1 % à plus de 16 % à l'échelle de l'événement. Deux événements tombés en cours de saison des pluies (7/08 et 13/08) et un événement en fin de saison (2/09), fournissent 76% de l'écoulement annuel (tableau 7.7, chapitre 7). Sur le bassin de El Viejo, dont l'aptitude au ruissellement est la plus faible, le coefficient de ruissellement est égal à 2 % et varie de 0,3 à 7,7 % à l'échelle l'événement. On voit apparaître sur la figure 8.3 des similitudes de fonctionnement entre les bassins versants El Muerto et Carboneras d'une part, les bassins El Tullido et El Viejo d'autre part. Le bassin versant de Pastelero a un comportement intermédiaire. Cette forte variabilité journalière

des coefficients de ruissellement nous amène à une analyse des relations entre lames ruisselées et hauteurs précipitées à l'échelle de l'averse similaire à celle que nous avons réalisée pour les parcelles expérimentales.

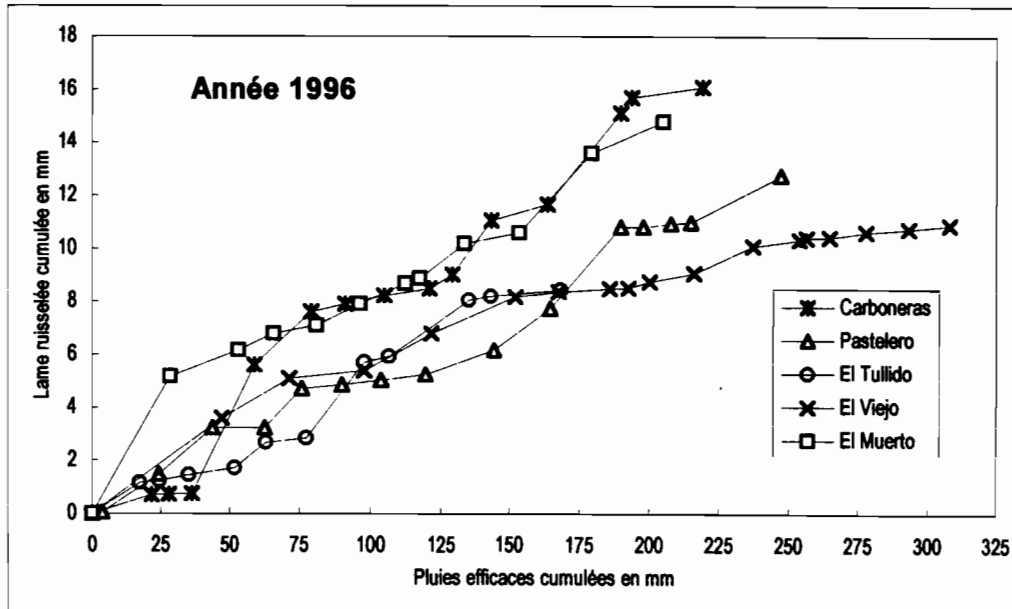


Figure 8.3. Lames ruisselées cumulées en fonction des précipitations efficaces cumulées sur les bassins versants de Carboneras, El Muerto, Pastelero, El Tullido et El Viejo.

Pour des averses avec ruissellement

A l'échelle des averses ayant produit un ruissellement, nous avons considéré, comme sur les parcelles, deux principaux facteurs : l'intensité des pluies d'une part, la fréquence des événements d'autre part. Les tableaux des annexes VIII.1 à VIII.5 montrent ainsi les valeurs des deux facteurs retenus pour expliquer la variabilité du ruissellement : l'intensité de la pluie à différents pas de temps (10, 15 et 30 minutes) et l'indice d'antériorité des pluies (IK1) qui tient compte à la fois de la fréquence des pluies et de la durée qui sépare deux averses successives.

Pour déterminer la valeur du coefficient α de l'indice d'antériorité des pluies (IK) qui explique le mieux les écoulements à l'échelle des bassins versants, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les racines carrées des lames ruisselées et l'indice de Kohler pour différentes valeurs de α . Les résultats de ces calculs sont présentés sur le tableau 8.6. Le choix de la racine carrée de la lame ruisselée est dû au comportement parabolique de la croissance des écoulements par rapport à la pluie moyenne (figure 8.4).

Tableau 8.6. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées sur les bassins versants et différents indices de Kohler ($\alpha = 0,1$ à $0,7$).

	Coefficients de décroissance de l'indice IK d'antériorité des pluies						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Carboneras	0,06	0,09	0,09	0,08	0,06	0,03	0,01
El Muerto	- 0,47	-0,37	-0,26	- 0,19	- 0,14	-0,12	-0,11
Pastelero	0,25	0,41	0,45	0,45	0,42	0,39	0,35
El Tullido	0,25	0,33	0,32	0,29	0,26	0,23	0,20
El Viejo	- 0,43	- 0,18	- 0,06	0,01	0,05	0,07	0,09

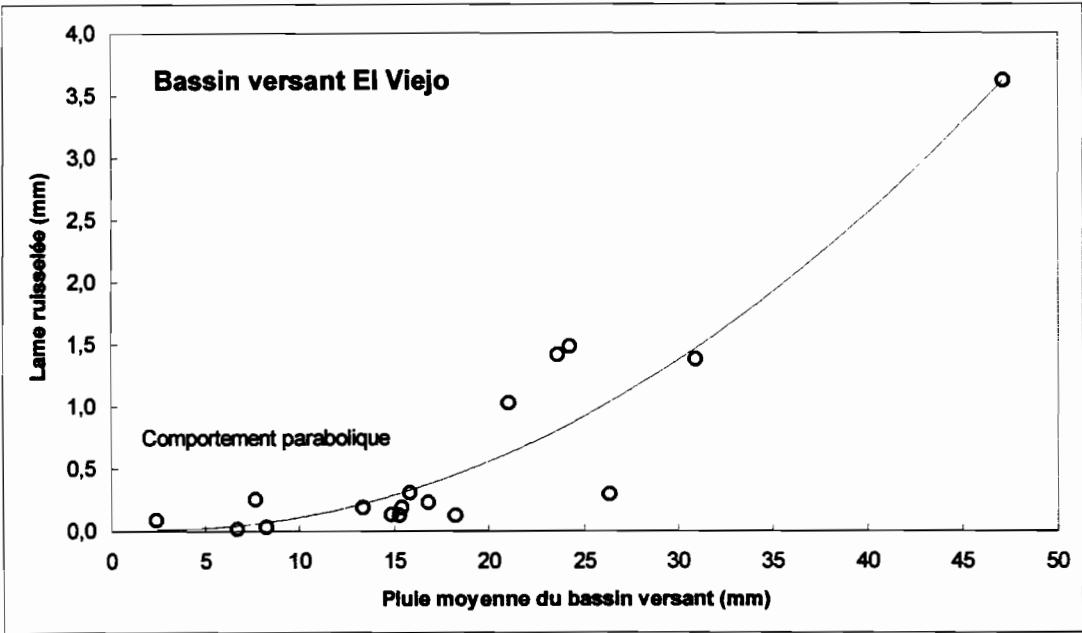


Figure 8.4. Comportement parabolique de la courbe de la lame ruisselée en fonction de la pluie moyenne sur le bassins versant de El Viejo.

L'examen du tableau 8.6 permet de constater que les valeurs $\alpha = 0,3$ et $0,2$ fournissent les meilleurs coefficients de corrélation pour les bassins versants Pastelero, El Tullido et Carboneras, mais avec des valeurs très faibles du coefficient de corrélation pour le bassin Carboneras. Pour les bassins versants Pastelero et El Tullido, la texture limono-sableuse des sols peut expliquer une valeur plus élevée de α ($0,3$ et $0,2$) qui correspond à un dessèchement plus rapide des sols sous l'action de l'évapotranspiration et du drainage. Pour les autres bassins versants (El Muerto et El Viejo) la corrélation est négative. Comme pour les parcelles, cette corrélation négative est due à la présence de forts événements pluvieux au début de la saison quand IK est faible. La répartition des fortes pluies au cours de la saison pluvieuse perturbe donc l'interprétation des corrélations entre IK et la lame ruisselée, ou sa racine carrée. L'indice IK nous servant essentiellement au calcul de

l'intensité de pluie limite du ruissellement, nous utiliserons pour les bassins versants la même valeur de α ($\alpha = 0,1$) que celle ayant servi à cette détermination sur les parcelles expérimentales.

Les corrélations, effectuées entre les racines carrées des lames ruisselées et les intensités maximales de pluie calculées sur des pas de temps allant de 5 à 90 minutes (tableau 8.7), montrent que pour les cinq bassins versants les coefficients de corrélation les plus élevés se situent entre les intensités maximales correspondant à des pas temps compris entre 15 et 45 minutes.

Tableau 8.7. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées sur les bassins versants et différentes intensités maximales de pluie sur ces mêmes bassins pour des pas de temps compris entre 5 et 90 minutes.

Pas de temps en mn	5	10	15	30	45	60	90
Carboneras	0,72	0,80	0,82	0,83	0,81	0,80	0,82
El Muerto	0,80	0,89	0,90	0,91	0,95	0,95	0,91
Pastelero	0,06	0,08	0,28	0,89	0,52	0,53	0,55
El Tullido	0,46	0,62	0,72	0,62	0,56	0,56	0,54
El Viejo	0,82	0,89	0,92	0,93	0,92	0,91	0,91

Le tableau 8.7 montre également que les différences entre coefficients de corrélation ne sont pas toujours significatives, sauf pour les bassins versants de Pastelero et El Tullido pour lesquels les intensités de pluie en 30 et 15 mn apparaissent nettement mieux corrélées à la lame ruisselée que les autres intensités. Le ruissellement sur les bassins versants apparaît donc très corrélé à l'intensité de pluie en 30 mn. Comme pour les parcelles expérimentales, cette forte corrélation s'explique en considérant que, en moyenne, plus de 70% du total de la pluie tombe en 30 minutes (chapitre 6).

Pour les averses sans ruissellement

L'examen des annexes VIII.1 à VIII.5 montre que de nombreux événements pluvieux (environ 80 %) ne produisent aucun ruissellement, soit en raison de la faible valeur du total pluviométrique, soit en raison de la faiblesse de l'intensité de la pluie. De la même façon que pour les parcelles expérimentales, nous avons mis en relation l'intensité de l'averse et l'indice de Kohler pour les événements pluvieux n'ayant produit aucun ruissellement. En utilisant les données pluviographiques du poste de Carboneras pour les années 1996 et 1997, nous avons porté sur la figure 8.5 les intensités pluviométriques au pas de temps de 30 minutes en fonction des indices de Kohler correspondant à la valeur $\alpha = 0,1$ (IK1) en distinguant les points correspondant aux événements avec et sans écoulement.

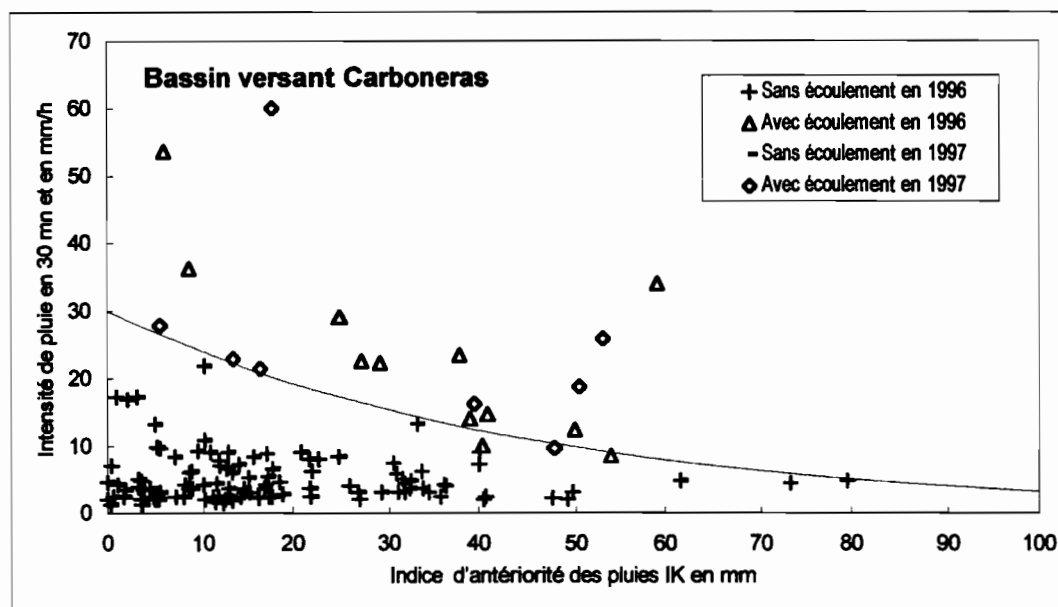


Figure 8.5. Intensités pluviométriques maximales au pas de temps de 30 minutes en fonction de IK ($\alpha=0,1$) pour les averses avec et sans écoulement sur le bassin versant de Carboneras.

Pour le bassin versant de Carboneras, la relation entre l'intensité de pluie limite de ruissellement (IL) et l'indice d'antériorité de pluies (IK1) est de la forme :

$$IL = 30 \cdot e^{-0,0223 \cdot IK1}$$

Comme pour les parcelles expérimentales, afin de tester l'intérêt de la pluie utile (PUIL) comme variable explicative de l'écoulement à l'échelle des bassins versants, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les racines carrées des lames ruisselées et la pluie totale de l'averse, PUIL et les différentes pluies utiles correspondant aux seuils d'intensité de 5, 6, 10 et 28 mm/h.. Les résultats de ces calculs sont reportés sur le tableau 8.8. La comparaison des coefficients de corrélation montre une nette supériorité de (PUIL) par rapport aux autres variables explicatives pour les bassins versants de Carboneras et Pastelero. Pour le bassin versant de El Viejo, les coefficients de corrélation sont presque identiques pour les différents seuils d'intensité, y compris PUIL. Pour les bassins versants El Muerto et El Tullido, l'introduction de PUIL n'apporte pas de gain significatif. Nous utiliserons cependant la variable PUIL comme variable explicative de l'écoulement pour tous les bassins car elle permet de tenir compte, indirectement, du fonctionnement hydrique des sols en relation avec l'intensité des pluies.

Tableau 8.8. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées sur les bassins versants, la pluie utile pour différents seuils d'intensité et la pluie totale.

	Seuils d'intensité en mm/h pour le calcul de la pluie utile				Pluie totale	PUIL
	5	6	10	28		
Carboneras	0,80	0,83	0,79	0,82	0,69	0,89
El Muerto	0,93	0,94	0,90	0,83	0,69	0,89
Pastelero	0,58	0,59	0,55	0,42	0,73	0,83
El Tullido	0,49	0,51	0,56	0,52	0,68	0,52
El Viejo	0,90	0,91	0,91	0,90	0,86	0,92

8.2. Modèles de régression linéaire

Les modèles de régression linéaire sont classés selon Ambroise et al. (1991) dans une approche statistique des modèles hydrologiques. Cette approche considère le système comme une boîte noire, elle ne permet pas d'analyser les différents mécanismes de fonctionnement du bassin versant. Ces modèles cherchent à mettre en relation une variable à expliquer et plusieurs variables explicatives. Les variables explicatives doivent, en théorie, être indépendantes.

Sur les parcelles expérimentales et sur les bassins versants du ranch Atotonilco, l'étude des relations entre le ruissellement et les différentes variables pluviométriques nous a permis de sélectionner deux variables explicatives :

- la pluie utile (PUIL), définie par un seuil d'intensité de pluie (IL) au-dessous duquel il n'y a pas de ruissellement,
- l'indice d'antériorité des pluies ou d'humectation des sols (IK), calculé sur la base d'une décroissance exponentielle de cet indice en fonction du temps.

Quelle que soit l'échelle d'observation, l'analyse des données a montré que le seuil d'intensité de pluie utilisé pour le calcul de la pluie utile varie entre une valeur maximale (IL0) pour un sol sec (IK = 0) et une valeur minimale (IL80) pour un sol bien humecté (IK = 80, valeur maximale observée pour l'indice d'humectation des sols). Elle a montré également que ce seuil décroît de manière exponentielle avec l'accroissement de l'indice d'humectation, cette décroissance est définie par un coefficient (β). IL0 et β constituent les deux paramètres caractéristiques du comportement à l'infiltration des sols.

Par ailleurs, aucune relation évidente n'a pu être établie entre l'indice d'humectation des sols et la lame ruisselée. Après plusieurs essais de corrélation entre IK et la lame ruisselée, pour différentes valeurs du coefficient de décroissance exponentielle (α) de IK, nous avons adopté la valeur $\alpha = 0,1$ bien que, pour les parcelles, les coefficients de corrélation soient négatifs et que pour les bassins versants, les valeurs 0,2 et 0,3 sont celles qui fournissent les meilleures corrélations. En choisissant la valeur $\alpha = 0,1$, l'indice d'humectation des sols croît au cours de la saison des pluies, de telle sorte qu'il prend des valeurs faibles en juin et juillet, fortes en août, septembre ou octobre.

Lorsque des fortes pluies surviennent exclusivement en début de saison, il peut y avoir une corrélation négative entre les deux variables explicatives IK et PUIL. Cette corrélation reste cependant fortuite, car les événements pluviométriques les plus forts ne sont pas systématiquement placés en début ou en fin de saison, mais se répartissent indifféremment tout au long de la saison des pluies estivales.

8.2.1. Principes de la régression multiple

La forme générale d'une régression linéaire multiple est la suivante :

$$Y' = A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_k X_k$$

où Y' représente la valeur estimée de Y ,
 A est la valeur constante de Y ,
les B_i sont les coefficients de régression,
les X_i sont les variables explicatives.

Les valeurs de A et des B_i sont déterminées de telle sorte que la somme des carrés des écarts entre les valeurs de Y et ses estimations Y' soit minimale. L'estimation de A et B_i par la méthode des moindres carrés implique que toutes les autres valeurs de la constante et des coefficients fournissent une estimation plus grande de la somme du carré des écarts entre Y et Y' . Cette méthode implique également que la corrélation entre Y et Y' soit maximale et que la corrélation entre les variables explicatives indépendantes et les résidus ($Y - Y'$) soit nulle.

Chaque coefficient de régression (B_i) correspond à la variation de Y associée à la variable explicative correspondante (X_i) lorsque toutes les autres variables sont maintenues constantes.

La somme des carrés des écarts entre Y et sa moyenne ($\bar{Y}$) peut être décomposée en deux parties dont l'une est expliquée par la régression et l'autre reste inexpliquée :

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (Y' - \bar{Y})^2 + \sum (Y - Y')^2$$

L'estimation par la méthode des moindres carrés garantit que la variation résiduelle de la variable Y est minimale quand l'estimation Y' est faite avec l'équation de régression. La proportion de variance expliquée par l'équation de régression peut être évaluée par le rapport :

$$R^2 = \frac{\sum (Y' - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}$$

Nous utiliserons le modèle de régression linéaire multiple à l'échelle des parcelles pour expliquer la lame ruisselée (L_r), à partir des deux variables explicatives PUIL et IK :

- PUIL étant la pluie utile calculée au pas de temps de 10 mn,
- IK étant l'indice des pluies antérieures calculé avec $\alpha = 0,1 \text{ jour}^{-1}$.

A l'échelle des bassins versants, pour linéariser la relation entre le ruissellement et la pluviométrie, nous utiliserons comme variable expliquée la racine carrée de la lame ruisselée (L_r)^{0,5} et comme variables explicatives :

- la pluie utile calculée au pas de temps de 30 mn,
- l'indice des pluies antérieures avec le même coefficient que pour les parcelles, $\alpha = 0,1$.

8.2.2. Relations obtenues à l'échelle des parcelles expérimentales

Nous présentons sur les tableaux 8.1 et 8.2 les données des parcelles expérimentales utilisées pour effectuer les régressions linéaires multiples. Par rapport aux observations reportées à l'annexe VII.1.1, il a été nécessaire d'écarter quelques événements anormaux s'éloignant très nettement des autres points formés par les couples de valeurs (L_r - PUIL) afin de conserver une bonne homogénéité à l'échantillon.

Sur le site Carboneras, nous avons éliminé pour toutes les parcelles l'événement survenu le 7/09/1996 pour lequel $IK = 54$ mm et $IMAX = 25$ mm/h, $IMAX$ étant l'intensité maximale de pluie sur le pas de temps de 10 mn. Une explication à cet événement extraordinaire peut être donnée en considérant le hyétogramme de l'averse (figure 8.6) qui est formé de deux pics d'intensité espacés de 50 mn. Cette configuration particulière du hyétogramme est susceptible de produire un ruissellement très important à l'occasion du second pic d'intensité par formation d'un matelas d'air dans les capillaires du sol. Par ailleurs, les événements de 27/08/1996 et du 28/08/1996 ont été assemblés en un seul événement faute d'explication cohérente au fonctionnement alterné des parcelles pour des pluies et des conditions d'humectation identiques. En assemblant les deux épisodes, l'événement résultant s'insère parfaitement au reste de l'échantillon. Enfin, nous avons éliminé pour la seule parcelle 1 l'événement du 30/08/1996 qui correspond probablement à une erreur d'observation du ruissellement sur cette parcelle.

Sur le site de El Viejo, nous avons éliminé pour toutes les parcelles l'événement survenu le 11/07/1996 pour lequel $IMAX = 108$ mm/h et $IK = 17$ mm, le ruissellement sur les parcelles ayant dépassé la capacité de stockage des cuves. Nous avons également éliminé pour la seule parcelle 4 l'événement du 12/09/1996 qui correspond probablement, comme l'événement du 30/08/1996 sur la parcelle 1, à une erreur d'observation du ruissellement sur cette parcelle.

Tableau 8.9. Données de base relatives à l'ajustement des modèles de régression linéaire multiple pour les parcelles expérimentales.

Numéro			Modèle de régression				Critère		
d'identification			Lr, IK1 et PUIL sont exprimés en mm				d'ajustement		
Piémont	CALCAIRE	1	Lr = -	1,9765	+	0,0247 IK1	+	0,3789 PUIL	47,4
		2	Lr = -	0,1634	-	0,0327 IK1	+	0,3279 PUIL	26,7
	RHYOLITE	3	Lr = +	0,1634	-	0,0326 IK1	+	0,6229 PUIL	99,9
		4	Lr = +	0,7600	-	0,0214 IK1	+	0,1940 PUIL	12,1
Bas glacis	CALCAIRE	5	Lr = -	2,9392	+	0,0378 IK1	+	0,6100 PUIL	12,1
		6	Lr = -	2,1498	-	0,0038 IK1	+	0,7757 PUIL	89,6
	RHYOLITE	7	Lr = -	0,1734	-	0,0053 IK1	+	0,6982 PUIL	104,5
		8	Lr = +	0,9075	-	0,0449 IK1	+	0,5517 PUIL	70,7

Le critère d'ajustement dans la dernière colonne du tableau ci-dessus correspond à la somme des carrés des écarts entre les valeurs de la lame ruisselée observée et les valeurs estimées par le modèle, critère qui sera utilisé pour comparer la qualité des ajustements.

Pour valider l'utilisation des modèles de régression linéaire multiple hors de la période de calage, il nous faut considérer la signification de la constante et des coefficients de régression.

En ce qui concerne la constante, celle-ci devrait être négative car pour un sol sec ($IK = 0$) et une pluie utile nulle ($PUIL = 0$), aucun ruissellement n'est possible. Elle correspond à la hauteur pluviométrique ruisselée qui alimente le stockage superficiel du sol. Il faut donc a priori éliminer d'une utilisation éventuelle les modèles de régression correspondant aux parcelles 3, 4 et 8 car leurs constantes sont négatives.

Le coefficient de régression relatif à l'indice d'humectation des sols (IK) est, selon les cas, négatif ou positif. Une valeur positive de ce coefficient (parcelles 1 et 5) signifie que l'indice IK correspond bien à l'indice d'humectation du sol car, en général, plus le sol est humide plus le ruissellement est abondant. Dans le cas contraire (parcelles 2, 3, 4, 6, 7 et 8), l'indice IK a une autre signification qui pourrait être celle d'un indice de couverture végétale herbacée. En effet, le couvert végétal herbeux se développe au cours de la saison de pluie, contribuant ainsi à favoriser l'infiltration et à limiter le ruissellement. Or le choix de la valeur $\alpha = 0,1$ provoque une augmentation progressive de IK au cours de la saison des pluies et son maintien à une valeur élevée jusqu'à la fin de la saison. La double signification de l'indice IK tient donc au choix de la valeur α . Deux parcelles ont un couvert végétal très abondant en fin de saison des pluies (tableau 5.7, chapitre 5) : les parcelles 4 (80 %) et 7 (74 %). Pour les autres parcelles, il faudrait disposer d'une description de l'évolution de la couverture végétale pour en confirmer son effet.

Le coefficient de régression relatif à la pluie utile ($PUIL$) est le principal paramètre du modèle de régression. Il est explicatif à lui seul le ruissellement des parcelles. On peut donc classer les parcelles selon un ordre croissant de leur aptitude au ruissellement basé sur la valeur de ce coefficient de régression, laquelle correspond sensiblement à celle du coefficient maximal de ruissellement :

	Coefficient de régression de $PUIL$	Coefficient maximal de ruissellement
parcelle 4 :	0,194	0,27
parcelle 2 :	0,328	0,38
parcelle 1 :	0,379	0,34
parcelle 8 :	0,552	0,63
parcelle 5 :	0,610	0,54
parcelle 3 :	0,623	0,59
parcelle 7 :	0,698	0,90
parcelle 6 :	0,776	0,68

8.2.3. Relations obtenues à l'échelle des bassins versants

Les tableaux des annexes VIII.1 à VIII.5 présentent les données de base relatives à l'ajustement des modèles de régression linéaire multiple pour les bassins versants Carboneras, El Muerto, El Tullido, Pastelero et El Viejo.

L'examen de la répartition des couples de valeurs PUIL-Lr ou PM-Lr, PM étant la pluie moyenne de l'averse sur le bassin versant et Lr la lame ruisselée à l'exutoire, révèle l'existence, comme sur les parcelles, de points anormaux qui témoignent soit d'un fonctionnement hydrologique particulier, soit d'erreurs d'observation ou de calcul. Ces anomalies sont fortes sur le bassin El Tullido, beaucoup moins fortes et moins nombreuses sur les autres bassins.

Sur le bassin versant El Tullido, les événements du 6, 24 et 31/ 08/1996 présentent des ruissellements anormalement forts. Sur l'annexe VII.3.6, les averses du 24 et 31 août sont caractérisées par des intensités faibles à moyennes : 12 mm/h en 30 mn le 24, 36 mm/h le 31. Elles arrivent sur des sols moyennement à fortement humectés (IK = 30 mm le 24, IK = 47 mm le 31) mais elles sont surtout précédées d'une petite averse tombée 2 heures avant le 24 et d'une averse plus forte tombée le 30 août, 13 heures avant celle du 31. L'événement du 6 août 1996 est caractérisé par une intensité très moyenne : 20 mm/h en 30 mn et par un IK très faible (4 mm). Par contre, après une intensité de 31 mm/h sur un pas de temps de 10 mn, l'averse se prolonge pendant une heure avec des intensités de 14 à 18 mm/h. La partie amont du bassin versant ayant été plus arrosée que la partie aval et le bassin versant étant très allongé, on peut penser que la durée assez longue de l'averse, avec des intensités suffisantes, provoque un meilleur transfert des écoulements de l'amont vers l'aval. A l'opposé des trois événements précédents, celui du 18 septembre 1996 présente un déficit d'écoulement très important. Un examen attentif des données de base montre l'absence d'enregistrement des hauteurs d'eau pour cette crue, alors que la cote observée à 8 heures (2,24 m) était inférieure de 2 cm à la cote de débordement (2,26 m). On peut donc éliminer cet événement de la série des observations, considérant qu'il s'agit d'une erreur d'observation. En ce qui concerne les trois événements à fort ruissellement, il est préférable de les séparer du reste de l'échantillon en considérant un autre type de comportement hydrologique du bassin versant à l'occasion de deux averses successives séparées de 2 à 13 heures ou d'une averse de longue durée à intensité moyenne à forte.

Pour le bassin El Muerto, deux événements se distinguent du reste de l'échantillon par des valeurs fortes de leurs lames ruisselées : les crues du 24 et du 31 août 1996. Elles sont caractérisées par des valeurs de IK très élevées (47 mm le 24 août, 52 mm le 31), mais par intensités de pluie en 30 mn faibles (13 mm/h le 24 et 10 mm/h le 31). L'importance du ruissellement peut s'expliquer le 24 août par l'occurrence de l'intensité maximale en fin d'averse (annexe VII.3.3), sur des sols déjà très humides en début d'averse. Pour la crue du 31 août, l'intensité pluviométrique maximale, malgré sa faiblesse, est suivie d'un très long épisode pluvieux de 90 mn dont les intensités sont très proches de l'intensité limite du ruissellement. On peut donc penser, pour cet événement, que les pertes par infiltration lors du transfert des écoulements sont minimales. Ces deux crues

correspondent donc à un fonctionnement hydrologique particulier du bassin versant et doivent être séparées du reste de l'échantillon.

Les observations effectuées à l'exutoire du bassin versant El Viejo présentent 4 événements aux lames ruisselées anormalement faibles : les 13, 20 et 23 août, ainsi que le 25 septembre 1996. Les faibles écoulements du 13 août et du 25 septembre s'expliquent par des valeurs de l'indice d'humectation des sols assez faible (23 et 25 mm) et des intensités de pluie en 30 mn plutôt faibles (29 et 28 mm/h). Pour les deux autres événements, la faiblesse des lames ruisselées pourrait s'expliquer dans les deux cas par une sous-estimation des volumes déversés. On peut donc écarter, pour des raisons différentes, ces 4 crues de l'échantillon observé en conservant à l'esprit que les crues du 13 août et du 25 septembre correspondent probablement à un fonctionnement hydrologique du bassin versant en situation de faible humectation des sols et de faible intensité de pluie.

Pour le bassin versant Carboneras, une seule crue, celle du 15 juin 1996, première crue de l'année, s'écarte nettement des autres valeurs de l'échantillon. Elle correspond à un indice d'humectation des sols très faibles (9 mm) et à une intensité de pluie en 30 mn modérée (36 mm/h). Elle peut donc être écartée du reste de l'échantillon pour la même raison que les crues du 13 août et 25 septembre sur le bassin versant de El Viejo.

Aucune anomalie n'a été décelée dans l'échantillon des données observées sur le bassin versant Pastelero.

Tableau 8.10. Constantes et coefficient du modèle de régression linéaire multiple pour les bassins versants.

Bassin versant	Modèle de régression	Critère d'ajustement
	Lr, IK1 et PUIL sont exprimés en mm	
Pastelero	$Lr = (-0,4648 + 0,0039 IK1 + 0,0736 PUIL)^2$	4,37
Carboneras	$Lr = (+0,0850 + 0,0013 IK1 + 0,0806 PUIL)^2$	3,50
El Muerto	$Lr = (+0,1920 - 0,0051 IK1 + 0,0829 PUIL)^2$	1,87
El Tullido	$Lr = (-0,1275 + 0,0114 IK1 + 0,0349 PUIL)^2$	2,51
El Viejo	$Lr = (+0,0453 + 0,0005 IK1 + 0,0469 PUIL)^2$	0,93

Comme pour les parcelles expérimentales, le modèle de régression linéaire multiple comprend trois paramètres : une constante, un coefficient de régression associé à IK et un coefficient de régression associé à PUIL.

La constante de régression prend des valeurs positives pour les bassins versants de El Muerto, Carboneras et El Viejo, négatives pour les bassins versants Pastelero et El Tullido. Normalement, cette constante devrait être négative ou égale à zéro car pour $PUIL = 0$ et $IK = 0$ la lame ruisselée doit être négative ou nulle, sauf à considérer qu'il existe un écoulement en l'absence de pluie. En 1996, après plusieurs jours de pluies, il a été observé sur le bassin versant El Viejo un écoulement de base d'une durée de trois jours au début du mois d'octobre. Bien que cet écoulement de base n'ait pas été observé sur les bassins de El Muerto et Carboneras, on peut envisager qu'il puisse exister sur ces bassins et accepter, dans certains cas, une valeur positive à la constante de régression. Cependant, il semble que la constante de régression ne puisse être prise en compte isolément mais qu'elle doive être associée au second terme de la régression relatif à l'indice d'humectation IK .

Le coefficient de régression associé à IK est positif sur tous les bassins versants, à l'exception de celui de El Muerto. Une valeur positive de ce coefficient, associée à une valeur négative de la constante de régression, comme c'est le cas des bassins Pastelero et El Tullido, signifie que pour une valeur faible de IK le bassin versant retient une plus grande quantité de pluie et qu'il existe une valeur limite de IK au delà de laquelle un écoulement supplémentaire vient s'ajouter à l'écoulement normal. Cette valeur limite de IK est égale à 11 mm pour le bassin El Tullido et à 120 mm le bassin Pastelero. Une valeur positive de ce coefficient, associée à une valeur positive de la constante de régression, renforce donc l'écoulement de base, indépendant de la valeur de $PUIL$. On remarquera que pour les bassins Carboneras et El Viejo, ce coefficient de régression est faible. Ainsi, pour $PUIL = 30$ mm et $IK = 80$ mm, l'accroissement de la lame ruisselée dû à la constante de régression et à IK n'est que de 17 % pour le bassin Carboneras, 15 % pour le bassin El Viejo. Cependant, l'influence de IK s'accroît avec des valeurs faibles de $PUIL$. Le cas du bassin El Muerto est particulier en ce que la valeur négative de son coefficient de régression semble donner une autre signification à l'indice IK , qui pourrait être, comme pour les parcelles, un indice de couvert végétal herbacé.

Le coefficient de régression associé à $PUIL$ correspond à l'influence plus ou moins forte de cette variable sur la lame ruisselée, dont l'accroissement associé à celui de $PUIL$ peut être estimé par la dérivée de L_r par rapport à $PUIL$. Du fait de la forme quadratique de la relation entre L_r et $PUIL$, cet accroissement augmente avec $PUIL$. Ainsi, pour le bassin versant Pastelero, pour $IK = 40$, l'accroissement de L_r est égal à 6 % pour $PUIL = 10$ mm, 17 % pour $PUIL = 20$ mm, 28 % pour $PUIL = 30$ mm. Pour comparer l'aptitude au ruissellement des bassins versants nous utiliserons une valeur de $PUIL$ égale à 20 mm et une valeur de IK égale à 40 mm car cette dernière valeur fut observée fréquemment pendant l'année 1996 sur tous les bassins versants. Le tableau suivant classe les bassins versants selon une aptitude croissante au ruissellement.

	Coefficient de régression de PUIL	Rapport L_r / PUIL pour $IK = 40$ et $PUIL = 20$	Coefficient annuel de ruissellement (1996)
El Muerto	0,0829	0,27	0,035
Carboneras	0,0806	0,24	0,034
Pastelero	0,0736	0,17	0,027
El Viejo	0,0469	0,11	0,021
El Tullido	0,0349	0,07	0,023

La pluie utile apparaît donc comme la principale variable explicative de la lame ruisselée, l'indice des pluies antérieures n'ayant qu'un rôle secondaire qui contribue cependant, sauf pour les bassins El Muerto et El Viejo, à un accroissement significatif de la lame ruisselée pour les pluies moyennes à faibles. Par exemple, pour le bassin El Tullido :

avec $PUIL = 20$ mm et $IK1 = 10$ mm, $L_r = 0,47$ mm,

alors que pour la même valeur de PUIL et $IK1 = 50$ mm, $L_r = 1,3$ mm.

8.3. Modèles globaux déterministes

Les modèles globaux considèrent le bassin versant comme une ensemble homogène. Ils utilisent donc des variables qui sont estimées à l'échelle du bassin : pluie moyenne par averse, lame ruisselée correspondante, indice moyen d'humectation des sols, intensité moyenne sur le bassin versant, et leurs paramètres de calage ont également une signification globale. Les modèles globaux déterministes se distinguent des modèles globaux stochastiques en ce qu'ils fournissent une signification physique à leurs paramètres mais leurs modalités d'ajustement peuvent être analogues à celles des modèles stochastiques, en utilisant par exemple la méthode des moindres carrés (Ambroise 1991).

Compte tenu de la taille des échantillons de données, 14 à 15 crues sur les parcelles expérimentales, 10 à 12 crues sur les bassins versants, il n'apparaît pas raisonnable de dépasser un nombre de deux à trois paramètres d'ajustement pour les modèles globaux déterministes utilisés pour reconstituer les apports à ces deux échelles d'observation dans le ranch Atotonilco. Pour les parcelles expérimentales, nous choisirons des modèles linéaires permettant de calculer la lame ruisselée en fonction de la pluie utile. A l'échelle des bassins versants, pour tenir compte de la forme parabolique de la relation entre la pluie utile et la lame ruisselée (figure 8.4), nous choisirons, comme pour les modèles déterministes, une forme quadratique à la relation entre la lame ruisselée et la pluie utile.

8.3.1. Principes

Modèle global linéaire de type Girard

Le premier modèle linéaire mis en œuvre s'inspire des travaux de Girard (1975) en remplaçant la pluie moyenne sur le bassin versant par la pluie utile (PUIL). Rappelons ici que celle-ci est calculée en éliminant, de la pluie moyenne à l'échelle du bassin versant, les hauteurs pluviométriques inférieures à l'intensité de pluie limite du ruissellement (IL), IL étant une fonction exponentielle décroissante de l'indice d'humectation des sols (IK) définie par deux paramètres : IL_0 pour $IK = 0$ et β , le coefficient de décroissance exponentielle (Cf. figure 8.6 où $IL_0 = 37$ mm et $\beta = -0,002$ mm⁻¹).

La lame ruisselée (L_r) est alors de la forme :

$$L_r = A (PUIL - B) \text{ avec}$$

où A est une constante, troisième paramètre du modèle,

B un paramètre qui varie linéairement en fonction de l'indice d'humectation des sols (IK) :

$$B = B_0 (1 - IK / IK_{\max})$$

B_0 et $IK_{\max}$ sont les quatrième et cinquième paramètres du modèle linéaire. Ils sont déterminés graphiquement de manière à encadrer les couples des valeurs L_r – PUIL (figure 8.7).

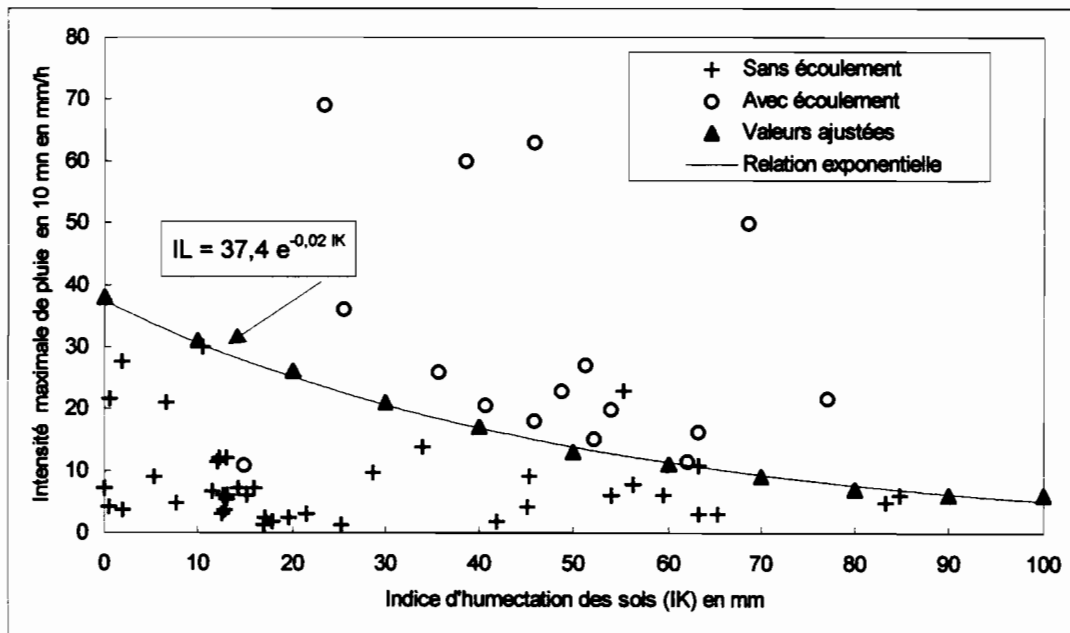


Figure 8.6. Relation entre l'intensité limite de ruissellement au pas de temps 10 mn et l'indice d'humectation des sols sur la parcelle 3 du bassin El Viejo.

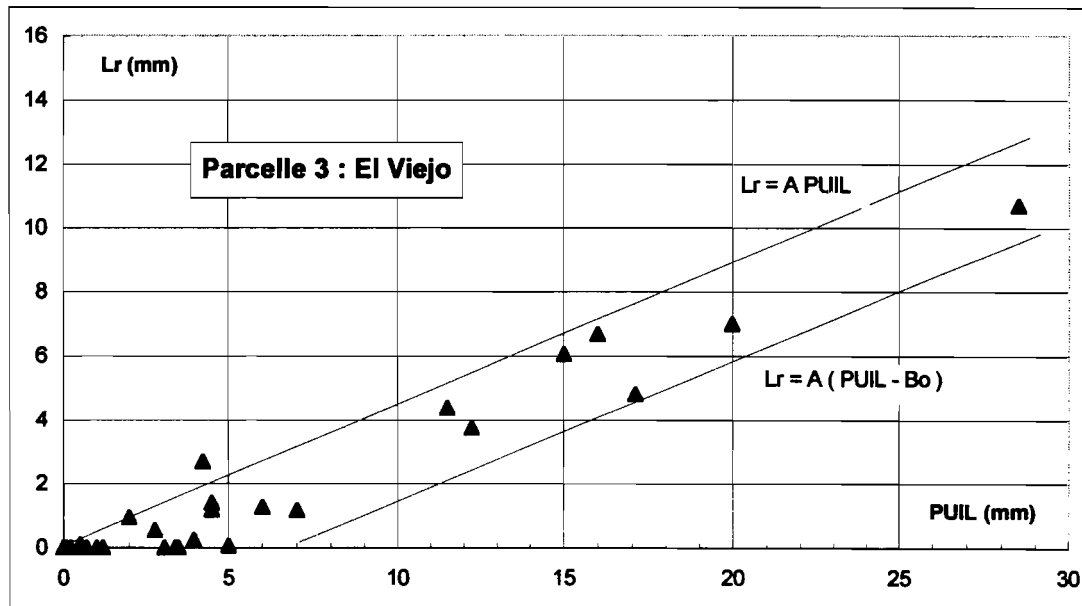


Figure 8.7. Modèle global linéaire permettant de calculer la lame ruisselée (L_r) à partir de la pluie utile (PUIL) sur le parcelle 3 du bassin versant El Viejo.

Modèle global linéaire à pente variable

Ce deuxième type de modèle global linéaire introduit un paramètre supplémentaire au modèle précédant pour tenir compte de l'intensité maximale de la pluie ($I_{\max}$) dans le calcul de la pente (A) de la relation $L_r = A (\text{PUIL} - B)$. Les quatre autres paramètres du modèle restent inchangés par rapport au modèle linéaire de type Girard.

La relation entre A et $I_{\max}$ est prise de la forme :

$$A = C I_{\max} \quad \text{pour } I_{\max} < D$$

$$A = C D = A_{\max} \quad \text{pour } I_{\max} > D$$

Par cette relation, on considère que le paramètre A atteint son maximum pour la valeur $I_{\max} = D$ et que le coefficient de ruissellement croît avec l'intensité de la pluie en dessous de la valeur seuil D . Cette croissance du coefficient de ruissellement avec l'intensité de la pluie correspond physiquement à une vitesse d'écoulement plus forte lorsque l'intensité de la pluie augmente, ce qui diminue les pertes au cours du transfert vers l'exutoire. La figure 8.8 présente un exemple d'ajustement de ces nouveaux paramètres C et D pour la parcelle 3 du bassin versant El Viejo. Sur cet exemple, pour $I_{\max} = 10 \text{ mm/h}$, $A = 0$ et pour $I_{\max} = 30 \text{ mm/h}$, $A = A_{\max} = 0,45$.

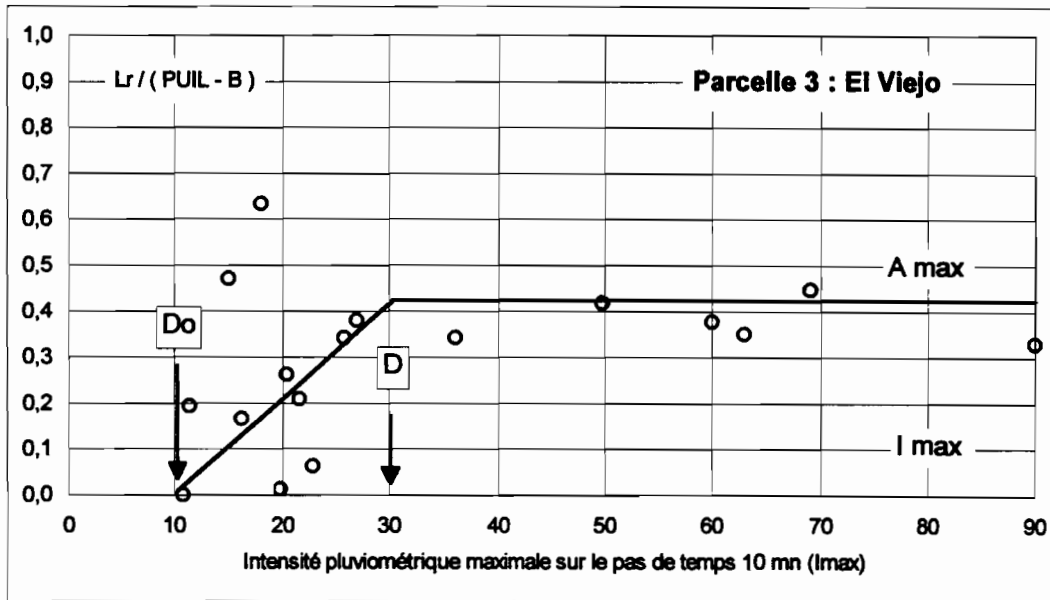


Figure 8.8. Relation entre le rapport $L_r / (PUIL - B)$ et l'intensité pluviométrique maximale sur le pas de temps 10 mn (I_{max}) pour la parcelle 3.

Modèle global quadratique

Le modèle global quadratique est de la forme :

$$L_r = (E \text{ PUIL} - F)^2$$

Il comprend quatre paramètres : deux pour le calcul de l'intensité de pluie limite du ruissellement et deux pour le calcul de la lame ruisselée :

- I_{lo} , intensité de pluie limite du ruissellement pour un sol sec ($IK1=0$),
- β , coefficient de décroissance exponentielle de IL en fonction de $IK1$,
- E , coefficient de croissance quadratique,
- F , constante quadratique.

Ce modèle est identique au modèle de régression linéaire multiple utilisant la racine carrée de la lame ruisselée comme variable à expliquer. La seule différence entre les deux modèles tient à l'introduction de IK dans la régression linéaire multiple.

Pour ajuster ce modèle quadratique aux données observées en 1996 sur les bassins versants, nous éliminerons dans un premier temps, comme pour le calcul des coefficients de régression, les valeurs anormales observées qui témoignent de fonctionnements particuliers des bassins versants.

Ces fonctionnements extraordinaires sont de deux types :

- Le premier type correspond à une situation de début de saison des pluies avec un indice d'humectation faible ($IK < 20$ mm).
- Le second type correspond à une situation d'humectation très forte des sols des bassins versants ($IK > 50$ et averses rapprochées) pour laquelle on peut considérer que le paramètre F est nul et le coefficient E plus fort que pour les autres événements.

La formulation mathématique de l'application du modèle quadratique est donc la suivante :

$$0 < IK < 50 \text{ mm} \quad L_r = (E \text{ PUIL} - F)^2 \text{ avec } F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min})(1 - IK / 50)$$

$$IK > 50 \text{ mm, averses rapprochées} \quad L_r = (G \text{ PUIL})^2$$

8.3.2. Calages à l'échelle des parcelles

Le tableau 8.11 présente les résultats des ajustements du modèle linéaire type Girard et du modèle linéaire à pente variable. Pour ces deux modèles, une colonne est réservée à la valeur du test d'ajustement qui est égal à la somme des carrés des écarts entre la lame ruisselée observée et la lame ruisselée calculée.

Le modèle linéaire de type Girard a été ajusté aux parcelles expérimentales en déterminant tout d'abord la pente moyenne de la relation entre la lame ruisselée et la pluie utile (A) à partir d'une valeur de B correspondant à des indices d'humectation (IK) compris entre 30 et 40 mm, valeurs les plus couramment observées au cours de la saison des pluies de l'année 1996. La valeur minimale du paramètre B a été prise égale à zéro pour $IK_{\max} = 60$ mm et sa valeur maximale (B_0 pour $IK=0$) a été déterminée graphiquement de manière à encadrer les points expérimentaux par les deux droites $L_r = A \text{ PUIL}$ et $L_r = A (\text{PUIL} - B_0)$ (figure 8.7).

Le modèle à pente variable a été ajusté (figure 8.8) en conservant les valeurs du paramètre B déterminées par le modèle linéaire de type Girard et en ajustant graphiquement les valeurs des paramètres suivants :

$A_{\max}$, valeur maximale du rapport $L_r / (\text{PUIL} - B)$,

D , valeur de $I_{\max}$ pour laquelle $A = A_{\max}$,

D_0 , valeur de $I_{\max}$ pour laquelle $A = 0$.

Tableau 8.11. Valeurs des paramètres des modèles globaux déterministes sur les parcelles expérimentales.

PARCELLE		Calcul de IL			B	Valeurs des paramètres des modèles globaux déterministes			
						Modèle type Girard		Modèle à pente variable	
		BETA	IL _{IK_0}	IL _{IK_80}	Bo	A	Test d'ajustement*	C	Test d'ajustement*
CALCAIRE	1	-0,0188	26,22	5,83	7,0	0,43	6,14	0,0125	5,77
	2	-0,0188	26,22	5,83	8,0	0,26	50,20	0,0075	14,40
RHYOLITE	3	-0,0199	37,37	7,61	7,0	0,46	22,90	0,0225	18,70
	4	-0,0194	39,14	8,29	9,0	0,21	8,40	0,0080	3,10
CALCAIRE	5	-0,0188	26,22	5,83	6,5	0,50	15,20	0,0140	21,50
	6	-0,0188	26,22	5,83	7,0	0,69	65,00	0,0225	23,50
RHYOLITE	7	-0,0172	32,00	8,08	8,0	0,48	58,80	0,0248	47,50
	8	-0,0199	37,37	7,61	7,0	0,40	13,90	0,0129	14,50
						Lcal = A (PUIL - B)		Lcal = C lmax (PUIL - B)	

*Test d'ajustement (1996) = Somme (Lr observée - Lr calculée)²

A = Pente de la relation entre Lr et (PUIL - B)

C = Pente de la relation entre le coefficient Lr / (PUIL - Po) lmax

Lr = lame ruisselée

lmax = intensité maximale en 10 mn

B = Abscisse à l'origine de la relation linéaire

L'examen du tableau 8.11 montre que l'introduction de l'intensité maximale en 10 mn dans le calcul du rapport $Lr / (PUIL - B)$ améliore nettement l'estimation de la lame ruisselée pour la plupart des parcelles, à l'exception des parcelles 5 et 8. L'amélioration est particulièrement nette sur les parcelles 2, 4 et 6. Pour classer les parcelles selon leur aptitude au ruissellement, il est donc préférable d'utiliser une des valeurs du rapport $Lr / (PUIL - B)$, par exemple celle qui correspond à $lmax = 50 \text{ mm/h}$. On peut penser que la classification ainsi obtenue reflète bien la réaction des parcelles aux fortes intensités de pluie. Le modèle global déterministe à pente variable conduit finalement à une classification des parcelles assez différente de celle qui a été obtenue avec les valeurs du coefficient de régression multiple associé à PUIL.

	Valeur du rapport $Lr / (PUIL - B)$ pour $lmax = 50 \text{ mm/h}$	Coefficient maximal de ruissellement (1996)
parcelle 4 :	0,20	0,27
parcelle 2 :	0,30	0,38
parcelle 8 :	0,45	0,63
parcelle 3 :	0,45	0,59
parcelle 1 :	0,50	0,34
parcelle 7 :	0,62	0,90
parcelle 5 :	0,70	0,54
parcelle 6 :	0,90	0,68

8.3.3 Calages à l'échelle des bassins versants

Le tableau 8.12 présente successivement les résultats des ajustements de trois modèles globaux déterministes : le modèle linéaire de type Girard, le modèle linéaire à pente variable et le modèle quadratique. Pour chacun de ces modèles, une colonne est réservée à la valeur du test d'ajustement.

L'examen du tableau 8.12 montre très nettement la supériorité du modèle quadratique pour l'estimation de la lame ruisselée, événement par événement, à l'échelle des bassins versants. Les valeurs du test d'ajustement sont en effet systématiquement inférieures avec le modèle quadratique et nous utiliserons ce modèle pour reconstituer les apports à l'échelle des bassins versants.

Tableau 8.12. Valeurs des paramètres des modèles globaux déterministes appliqués aux bassins versants.

Bassins versants	Calcul de IL			B	Valeurs des paramètres des modèles globaux déterministes						
					Modèle type Girard		Modèle à pente variable		Modèle quadratique		
	BETA	IL_IK_0	IL_IK_80	B pour IK = 0	A	Test d'ajustement*	C (Valeur de la pente)	Test d'ajustement*	E	F	Test d'ajustement*
Pastelero	-0,02	20,42	4,60	13	0,140	3,51	0,0032	5,30	0,060	0,000	2,99
Carboneras	-0,02	30,00	5,04	14	0,176	11,14	0,0080	13,44	0,082	0,024	4,09
El Muerto	-0,02	28,11	5,24	10	0,181	10,17	0,0040	5,11	0,083	0,042	3,10
El Tullido	-0,01	19,34	7,40	15	0,059	4,08	0,0010	8,10	0,049	0,001	0,13
El Viejo	-0,02	22,60	3,89	17	0,082	3,72	0,0011	3,52	0,045	0,027	1,26
					Lcal = A (PUIL - B)		Lcal = C · Imax (PUIL - B)		Lcal = (E PUIL - F) ²		

*Test d'ajustement (1996) = Somme (Lr observée - Lr calculée)² C = Pente de la relation entre le coefficient Lr / (PUIL - B) Imax
A = Pente de la relation entre Lr et (PUIL - B) Imax = Intensité maximale en 30 mn
Lr = lame ruisselée B = Abscisse à l'origine de la relation linéaire

La comparaison des deux modèles linéaires nous révèle la faible influence de l'intensité de pluie en 30 mn sur la lame ruisselée. L'introduction de cette intensité maximale en 30 mn dans le calcul de la pente moyenne de l'écoulement ($A = C \text{ Imax}$) ne procure en effet une nette amélioration de l'estimation de la lame ruisselée que pour le plus petit bassin versant, celui de El Muerto d'une superficie de 0,15 km².

La comparaison des valeurs du test d'ajustement des modèles globaux quadratiques déterministe et stochastique à régression multiple montre que le modèle déterministe procure un meilleur ajustement pour les bassins versants Pastelero et El Tullido dont les couples des valeurs sont très dispersés. Pour les autres bassins versants, le modèle stochastique fournit une meilleure estimation de la lame ruisselée. Cependant, le gain n'est significatif que pour le bassin versant El Muerto. En outre, le modèle stochastique présente l'inconvénient d'une perte de signification de la constante quadratique, laquelle devrait être toujours négative ou nulle, alors qu'elle est positive pour

les bassins Carboneras, El Muerto et El Viejo. Par contre, sauf à considérer pour IK une autre signification que celle d'un indice d'humectation des sols, le coefficient associé à IK dans le modèle stochastique devrait être toujours positif car il est difficile d'accepter une diminution de l'aptitude des sols au ruissellement avec une augmentation de leur humidité. Pour toutes ces raisons, il semble préférable d'utiliser le modèle déterministe dans la suite de nos travaux.

8.4. Conclusion

L'analyse des relations entre la pluie et la lame ruisselée aux échelles des parcelles (60 m²) et des bassins versants (0,15 à 4 km²) montre très nettement le rôle de l'intensité des pluies dans la genèse du ruissellement. Elle intervient directement à l'échelle des parcelles dans l'estimation de la pente du modèle linéaire, indirectement aux deux échelles dans le calcul de la pluie utile (PUIL) par la seule prise en considération des pluies dont l'intensité dépasse un certain seuil, appelé intensité de pluie limite du ruissellement (IL). A l'échelle des parcelles expérimentales, compte tenu du temps de concentration des parcelles, il semble nécessaire de déterminer ce seuil au pas de temps de 10 minutes. A l'échelle des bassins versants, il peut être déterminé au pas de temps de 30 minutes.

Le seuil d'intensité de pluie limite du ruissellement varie en fonction de l'indice des pluies antérieures (indice de Kholer, IK) qui varie lui même entre une valeur maximale en début de saison pluvieuse (IK = 0) et une valeur minimale en cours de saison pluvieuse (IK > 60 mm). En l'absence de pluie, la décroissance de IK en fonction du temps est de type exponentielle. A l'échelle des parcelles, le coefficient de décroissance (α) le mieux corrélé avec la lame ruisselée est égal à 0,1 jour⁻¹. A l'échelle des bassins versants, la valeur la mieux corrélée avec la lame ruisselée varie de 0,1 jour⁻¹ pour les bassins El Muerto et El Viejo à 0,2 jour⁻¹ pour les bassins Carboneras et El Tullido, 0,3 jour⁻¹ pour le bassin Pastelero. Afin d'homogénéiser le calcul de l'indice des pluies antérieures, nous avons adopté la valeur $\alpha = 0,1$ jour⁻¹ pour tous les bassins versants.

La décroissance de l'intensité de pluie limite du ruissellement en fonction de IK est aussi de type exponentiel et le coefficient de décroissance (β) varie de 0,017 à 0,020 mm⁻¹ pour les parcelles expérimentales (tableau 8.11, colonne BETA), de 0,01 à 0,1 mm⁻¹ pour les bassins versants (tableau 8.12, colonne BETA). Pour les bassins versants El Viejo et Carboneras, sur lesquels sont installées les parcelles expérimentales, on peut remarquer que les valeurs de β sont quasiment identiques ($\beta = 0,02$ mm⁻¹) aux deux échelles. Nous considérerons ce paramètre, au même titre que IL-IK-0, comme des paramètres cachés du modèle global hydrologique permettant de déterminer les lames ruisselées à partir de la connaissance des chutes de pluie.

A l'échelle des parcelles expérimentales, le modèle linéaire à pente variable est celui qui procure les meilleurs ajustements pour la plupart des parcelles. Il est de la forme :

$$Lr = C \cdot Imax \cdot (PUIL - B) \dots avec \dots B = Bo \cdot \left(1 - \frac{IK}{60}\right)$$

A l'échelle des bassins versants, c'est le modèle global quadratique déterministe ou stochastique qui s'ajuste le mieux aux observations sous la forme suivante :

$$Lr = (E \cdot PUIL - F)^2$$

Sur la base d'un calage à partir des observations de l'année 1996, F est une fonction linéaire de IK dans le modèle déterministe, alors que F est une constante dans le modèle déterministe. L'inconvénient du modèle stochastique réside dans la perte de signification des paramètres du modèle après ajustement, plus particulièrement en ce qui concerne le paramètre F qui prend des valeurs positives ou négatives selon les bassins versants alors qu'il devrait être toujours négatif ou nul pour une valeur forte de IK. Dans la suite de ce travail, nous utiliserons donc à l'échelle des bassins versants le modèle quadratique déterministe de préférence au modèle quadratique stochastique. Les paramètres E et F seront les paramètres apparents du modèle global quadratique. E sera appelé coefficient de croissance quadratique et F constante quadratique.

CHAPITRE 9

ANALYSE SPATIALE DES DONNEES HYDROLOGIQUES

Les facteurs pédologiques et phytoécologiques interviennent principalement sur la variabilité spatiale des écoulements superficiels et secondairement sur leur variabilité temporelle. Ils sont en effet susceptibles d'expliquer les différences de comportement entre parcelles et entre bassins versants. Pour rendre compte de la variabilité spatiale des données hydrologiques et expliquer cette variabilité, l'outil utilisé est l'Analyse en Composantes Principales (ACP) qui portera sur l'analyse des données collectées sur :

- sept bassins versants expérimentaux caractérisés par des organisations séquentielles différentes (systèmes simple, binaire et ternaire), et dont les superficies varient de 15 à 400 ha (Cf. chapitres 5 et 7).
- huit parcelles expérimentales dont quatre sont installées sur des matériaux sédimentaires calcaires et quatre sur des matériaux éruptifs (Cf. chapitres 5 et 7).

A l'échelle des parcelles, nous ferons intervenir les descriptions relatives à la topographie et à la géomorphologie, à la granulométrie et à la pierrosité, à la teneur en carbonate de calcium et à la stabilité structurale, à la couverture végétale et à son absence. A l'échelle des bassins versants nous ferons intervenir la géologie, la morphologie, la pédologie, le type de couverture végétale et son taux de recouvrement.

Le principe essentiel de l'ACP est la transformation d'un certain nombre de variables quantitatives en un nouveau nombre réduit de variables, cette fois non corrélées, appelées "composantes principales" (Philippeau 1986). En effet, lorsqu'on étudie une série d'individus à partir de variables qui les caractérisent, il est difficile de synthétiser l'information si le nombre des variables est trop élevé. Si la caractérisation des individus ne se fait qu'à partir de deux ou trois variables, il est alors plus facile de décrire leur comportement en utilisant le plan ou l'espace à trois dimensions. Quand le nombre de variables devient plus important, cette procédure est inutilisable, il est alors nécessaire de regrouper les individus selon leur proximité dans l'espace à n dimensions, cette espace correspondant aux n variables qui caractérisent chaque individu.

9.1. A l'échelle des parcelles expérimentales

9.1.1 Données hydrologiques et descriptives

Les parcelles expérimentales sont au nombre de huit, réparties en deux groupes : un ensemble de quatre parcelles sur matériaux éruptifs (rhyolite et toba, roche sédimentaire acide analogue à un tuf), installées sur le bassin versant d'El Viejo, et un ensemble de quatre autres parcelles sur matériaux sédimentaires (calcaire), installées sur le bassin versant Carboneras. Chaque parcelle a une superficie d'environ 60 m².

Leur fonctionnement hydrologique est décrit par six variables explicatives du ruissellement déterminées au sous-chapitre 8.1.1 :

- Le coefficient d'écoulement saisonnier (COEF) en ne considérant que la saison des pluies, c'est à dire la période d'observation allant de juin à octobre.
- La quantité de pluie utile stockée à la surface ou dans le sol avant ruissellement pour un indice $IK = 40$ mm (B_40). Cette quantité est déterminée à partir du modèle linéaire de type Girard.
- L'intensité limite de ruissellement pour la valeur zéro de l'indice IK (IL_{IK_0}), IK étant l'indice des pluies antérieures ou indice d'humectation des sols, calculé avec un coefficient de décroissance exponentielle égal à 0,1 ($\alpha = 0,1$).
- L'intensité limite de ruissellement pour une forte valeur (80 mm) de l'indice IK , ($IL_{IK_{80}}$).
- La pente moyenne de l'écoulement déterminée par le modèle linéaire de type Girard (PEN_{ECO}). Cette variable est très corrélée (figure 9.1) avec le rapport L_r / I_{max} (PUIL-B) du modèle linéaire à pente variable, calculé pour une valeur $I_{max} = 50$ mm/h.
- La valeur du coefficient de décroissance exponentielle de l'intensité limite de ruissellement en fonction de l'indice IK (BETA).

Associée au fonctionnement hydrologique, l'érosion hydrique des parcelles est représentée par une seule variable, la variable érosion (ERO) qui correspond au cumul annuel des sédiments déposés dans la fosse de réception et convertis en tonnes par hectare.

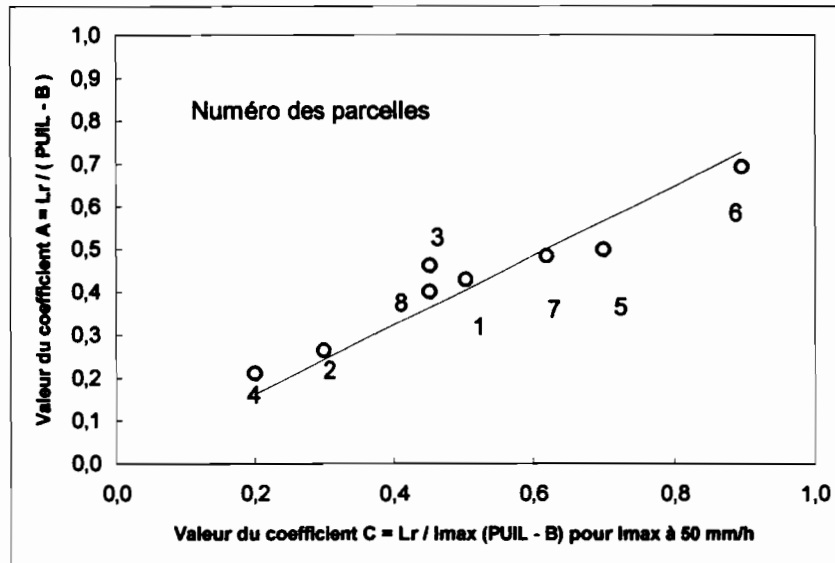


Figure 9.1. Corrélation entre la pente moyenne de l'écoulement du modèle linéaire de type Girard et la valeur du rapport $Lr / (PUIL - B)$ pour $Imax = 50$ mm/h.

Les caractéristiques physiographiques des parcelles sont décrites par un total de 17 variables qui peuvent être regroupées en trois ensembles : les variables physiques, chimiques et descriptives de la végétation.

Variables physiques

- La pente des parcelles (PENTE) en pourcentage.
- Les caractéristiques du sol lui-même qui sont : la profondeur du sol en cm (E_SOL), la proportion d'éléments grossiers avec le pourcentage de refus au-dessous de la maille de 2 mm (REFUS), le pourcentage de sables dont la taille des éléments est comprise entre 2 mm et 200 μm (SABLE), des argiles dont la taille des éléments est inférieure à 2 μm (ARGILE), des limons dont la granulométrie est intermédiaire entre sables et argiles (LIMON) et la somme des deux derniers pourcentages (ARG_LIM).
- La couverture superficielle du sol en éléments grossiers de taille supérieure à 2 cm (P_SUP2) et inférieure à 2 cm (P_INF2) ainsi que la somme de ces deux derniers (SOM_P). Ces trois variables sont exprimées en pourcentages de recouvrement de la superficie totale du sol (Cf. chapitre 5, tableau 5.7).
- Un coefficient d'instabilité structurale du sol (INEST) calculé à partir du test de stabilité structurale de Hénin et al. (1958) sur terre à 2 mm.

Variables Chimiques

- Trois variables chimiques du sol ont été retenues : les quantités de CaCO_3 (CACO3) et de carbone (CARBO) exprimées en pourcentages, ainsi que le pH du sol (PH).

Variables descriptives de la végétation

- Au niveau de la surface du sol, quatre variables ont été mesurées en fin de saison des pluies : le type de couverture végétale (T_COUV), le taux de recouvrement basal de la végétation exprimé en pourcentage (C_VEG) et la proportion de sol nu (S_NU).

Les quatre variables descriptives représentant les couvertures superficielles du sol en éléments grossiers (P_SUP2 et P_INF2), les taux de recouvrement de la végétation et du sol nu (C_VEG et S_NU) sont liées par une relation d'association telle que la somme de ces quatre variables est égale à 100%. Toutes les variables sont présentées pour chacune des parcelles à l'annexe IX.1.

9.1.2. Résultats de l'ACP

Les 24 variables analysées sont de différente nature (ruissellement, érosion, pente...) et quantifiées par des unités également différentes (coefficient de ruissellement compris entre 0 et 1, % de recouvrement, t/h pour l'érosion, % de pente...). Pour donner la même importance aux variables, les données centrées réduites sont utilisées dans les matrices de corrélation.

Dans une première étape, l'ACP a été réalisée en considérant l'ensemble des variables et des observations. Le tableau 9.1 montre les coefficients de corrélation et leurs carrés entre chacune des variables et les axes principaux. La somme des carrés des coefficients de corrélation d'une variable donne la part expliquée, pour cette variable, par le groupe d'axes considérés. Les figures 9.2 (A) et (B) présentent les projections des variables sur les plans définis par les axes principaux 1-2, et 2-3 de l'ACP.

Tableau 9.1. Coefficients de corrélation des variables par rapport aux axes principaux de l'ACP.

Axes principaux	Coefficients de corrélation				Coefficients de corrélation au carré				Somme
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Variables									
PENTE	-0,54	-0,74	-0,13	-0,20	0,30	0,54	0,02	0,04	0,89
E_SOL	-0,41	0,61	0,39	0,34	0,17	0,37	0,15	0,11	0,81
P_INF2	0,53	-0,31	0,74	0,04	0,29	0,10	0,55	0,00	0,93
P_SUP2	-0,37	-0,57	-0,01	0,55	0,14	0,33	0,00	0,31	0,77
SOM_P	0,20	-0,60	0,57	0,38	0,04	0,36	0,33	0,14	0,87
C_VEG	-0,44	0,58	-0,46	-0,43	0,19	0,33	0,21	0,19	0,93
S_NU	0,74	0,09	-0,37	0,16	0,55	0,01	0,14	0,03	0,72
T_COUV	-0,78	0,23	-0,06	-0,01	0,61	0,05	0,00	0,00	0,67
REFUS	-0,01	0,49	-0,35	-0,64	0,00	0,24	0,12	0,42	0,78
SABLE	0,07	0,03	-0,82	0,52	0,00	0,00	0,68	0,27	0,95
LIMON	0,71	-0,25	0,29	-0,51	0,51	0,06	0,08	0,26	0,92
ARGILE	-0,59	0,10	0,73	-0,21	0,35	0,01	0,53	0,04	0,93
ARG_LIM	-0,10	-0,06	0,83	-0,50	0,01	0,00	0,70	0,25	0,96
CARBO	-0,32	-0,80	-0,29	-0,27	0,11	0,64	0,09	0,07	0,91
CACO3	0,81	0,21	0,32	-0,11	0,66	0,04	0,10	0,01	0,81
PH	0,93	-0,10	-0,26	0,11	0,86	0,01	0,07	0,01	0,95
INEST	-0,22	0,76	0,19	0,31	0,05	0,57	0,04	0,10	0,76
ERO	-0,54	0,50	0,17	0,61	0,30	0,25	0,03	0,37	0,95
COEF	0,82	0,46	0,25	0,07	0,67	0,21	0,06	0,01	0,94
B_40	-0,80	-0,16	-0,26	-0,16	0,64	0,03	0,07	0,02	0,76
IL_IK_0	-0,89	0,10	0,36	0,02	0,79	0,01	0,13	0,00	0,93
IL_IK_80	-0,86	0,35	0,24	-0,15	0,74	0,12	0,06	0,02	0,94
PEN_ECOU	0,75	0,48	0,30	0,11	0,56	0,23	0,09	0,01	0,89
BETA	0,32	0,49	-0,37	-0,36	0,11	0,24	0,14	0,13	0,61
Inertie totale %	35,95	19,86	18,22	11,75					

Définition des axes principaux de l'ACP

Le tableau 9.1 montre que le premier axe de l'ACP (dernière ligne du tableau) mobilise 36% de l'inertie totale du nuage de points, tandis que les axes 2 et 3 en mobilisent 38% et l'axe 4 seulement 12 %. Un examen plus détaillé de ce tableau et de ses représentations graphiques (figures 9.2 A et B) permet de caractériser les trois premiers axes de l'ACP :

- ♦ **L'axe 1** caractérise l'importance de l'écoulement, car les variables COEF et PEN_ECOU sont opposées aux variables IL_IK_0 et B_40;
- ♦ **L'axe 2** met en opposition la pente et la couverture végétale;
- ♦ **L'axe 3** est associé à la granulométrie du sol.

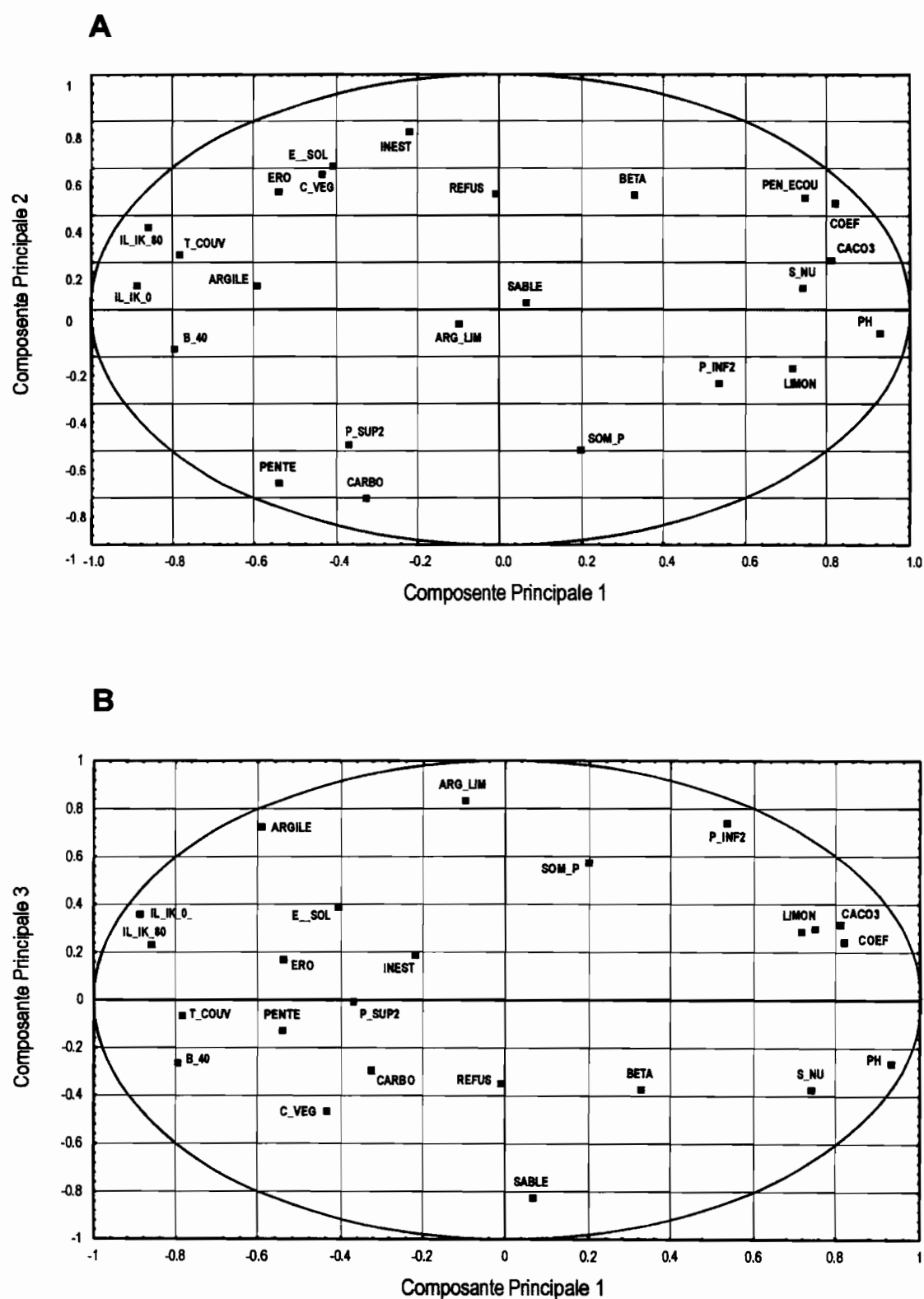


Figure 9.2. Représentation des variables sur le plan des axes 1 et 2 (A) et 1 e 3 (B).

A priori, le premier axe définit donc les variables qui peuvent favoriser ou empêcher l'écoulement. Les variables caractéristiques de la physiographie des parcelles qui sont associées aux variables favorisant le ruissellement sont donc le pH (PH), la présence de CaCO_3 (CACO3), le sol nu (S_NU), la teneur en limons (LIMON) et la pierrosité de taille inférieure à 2 cm (P_INF2). Les variables physiographiques qui s'opposent au ruissellement sont le type de couverture végétale (T_COUV), la teneur en argile (ARGILE) et la pente (PENTE) associée à la teneur en carbone (CARBO).

Sur le deuxième axe se retrouvent associées avec la couverture végétale (C_VEG), les variables de stabilité structurale (INEST), l'épaisseur du sol (E_SOL), l'érosion (ERO) et le refus à 2 mm (REFUS). En opposition à ces variables sont associés la pente (PENTE), la teneur en carbone (CARBO), la pierrosité supérieure à 2 cm (P_SUP2) et la pierrosité totale (SOM_P).

L'axe 3 se définit comme l'axe de la texture du sol avec les argiles et limons en opposition avec les sables. La pierrosité est associée aux argiles et limons (cf. figure 9.2B).

Sélection des variables descriptives

En ce qui concerne les variables descriptives des parcelles expérimentales, plusieurs de ces variables peuvent être corrélées entre elles. Nous avons donc calculé (annexe IX.2) les coefficients de corrélation entre les différents couples de variables descriptives. L'examen de ce tableau permet de constater de bonnes corrélations entre les variables suivantes :

- la pente et la teneur en carbone (0,87),
- la somme de la pierrosité et la pierrosité de diamètre inférieure à 2 cm (0,79),
- l'argile et l'association argile-limon (0,80),
- le pH et le sol nu (0,79).

A l'échelle des parcelles expérimentales, la bonne relation entre la pente du terrain et la teneur du sol en carbone peut s'expliquer par le comportement du bétail qui commence à brouter les pâturages les plus faciles d'accès, c'est à dire ceux qui sont situés en bas de pente (parcelles de haut glacis aux pentes comprises entre 8 et 11 %). Il n'accède aux pâturages les plus hauts (parcelles de piémont aux pentes comprises entre 15 et 18 %) que lorsque le fourrage vient à manquer en aval. Nous conserverons donc la teneur en carbone comme variable explicative, de préférence à la pente, dont le rôle réducteur du ruissellement ne peut être généralisé.

On observe une bonne relation entre la somme des pierrosités, la pierrosité de diamètre inférieur à 2 cm d'une part et la pierrosité de taille supérieure à 2 cm (cailloux) d'autre part. Cependant, la corrélation entre les pierrosités de taille supérieure et inférieure à 2 cm est nulle. Nous conserverons donc comme variables descriptives de la pierrosité les deux variables P_INF2 P_SUP2.

La faible relation entre la teneur des sols en argiles et leur teneur en limons nous incite à conserver ces deux variables et à éliminer la variable qui associe ces deux teneurs (ARG_LM).

La bonne corrélation entre le pH et la proportion de sol nu s'explique de manière fortuite par une autre corrélation entre le pH et la teneur du sol en carbonate de calcium. En effet, ce sont les parcelles expérimentales du versant sédimentaire calcaire de Carboneras qui cumulent à la fois les fortes teneurs en carbonate de calcium et les plus forts taux de recouvrement en sol nu. Par contre, pour les parcelles du versant d'El Viejo sur matériaux éruptif, la teneur en carbonate de calcium est nulle. Cette dernière variable n'a donc aucune signification pour les quatre parcelles de ce bassin. Des trois variables, pH, teneur en carbonate de calcium et taux de recouvrement en sol nu, nous conserverons donc comme variables descriptives, la teneur du sol en carbonate de calcium et la proportion de sol nu.

Sélection des variables explicatives de l'écoulement

Après l'analyse temporelle de la variabilité de l'écoulement, nous avons identifié six variables qui le caractérisent :

- le coefficient saisonnier d'écoulement (COEF),
- la quantité de pluie utile stockée à surface ou dans le sol avant ruissellement pour un indice $IK = 40$ mm (B_40),
- les intensités de pluie limites du ruissellement pour les valeurs IK égal à zéro et IK égal à 80 (IL_IK_0 et IL_IK_80),
- la pente moyenne de l'écoulement déterminée par le modèle linéaire de type Girard (PEN_ECOU),
- le coefficient de décroissance de l'intensité de pluie limite de ruissellement en fonction de l'indice IK (BETA).

Or l'intensité de pluie limite du ruissellement pour IK égal à 80 peut être déterminée par la relation :

$$IL\_IK\_80 = IL\_IK\_0 \text{ EXP}(-BETA \ 80)$$

Il n'est donc pas nécessaire de conserver la variable IL_IK_80 dans le groupe des variables caractéristiques de l'écoulement. De même il n'est pas nécessaire de conserver les deux variables COEF et PEN_ECOU qui sont très corrélées (Cf. matrice de corrélation sur l'annexe IX.2) et nous conserverons la seconde. Celles-ci se réduisent donc à quatre.

Ayant réalisé cette première sélection entre les variables descriptives des parcelles (17 variables), nous allons maintenant chercher à expliquer les quatre variables caractérisant le ruissellement à partir des quatorze variables restantes.

Sur la matrice de corrélation (annexe IX.2), la pente moyenne de l'écoulement apparaît corrélée négativement avec la teneur en carbone (-0,74) et positivement avec la teneur en carbonate de calcium (0,74). Elle apparaît plus faiblement corrélée positivement avec le taux de recouvrement du sol nu (0,45), la teneur en limon (0,52) et la pierrosité inférieure à 2 cm (0,51). L'inconvénient d'utiliser la teneur en carbonate de calcium tient à ce que cette variable est égale à zéro sur tous les sols sur matériaux éruptifs non influencés par des massifs calcaires plus en amont. Elle peut être

utilisée pour les sols carbonatés mais doit être écartée pour les autres types de sols. La bonne corrélation entre la pierrosité inférieure à 2 cm et la teneur en limons permet d'éliminer la teneur en limon comme variable explicative de la pente moyenne de l'écoulement. L'augmentation du ruissellement avec l'accroissement de la pierrosité de taille inférieure à 2 cm peut se justifier aisément mais la diminution du ruissellement avec l'augmentation de la teneur en carbone est plus difficile à justifier. On observe en effet sur l'annexe IX.2 une absence de corrélation entre la teneur en carbone et l'intensité de pluie limite du ruissellement mais, par contre, une corrélation positive entre la quantité de pluie stockée à la surface du sol (B_40) et la teneur en carbone.

Sur le même tableau de l'annexe IX.2, l'intensité limite de ruissellement pour $IK = 0$ (début de saison des pluies) est fortement corrélée positivement avec la teneur en argile (0,84) et le type de couverture végétale (0,78), négativement avec la proportion de sol nu (- 0,75) et la teneur en limons (- 0,61). La proportion de sol nu étant assez bien corrélée négativement avec la teneur en argiles et la teneur en limons avec le type de couverture végétale, nous ne conserverons, pour expliquer l'intensité limite de ruissellement sur sol sec (IL_IK_0), que les deux autres variables descriptives : la teneur en argiles (ARGILE) et le type de couverture végétale (T_COUV). Le rôle de la teneur en argiles dans l'infiltrabilité des sols secs est à mettre en relation avec une meilleure structuration des sols argileux et le rôle du type de couverture végétale avec l'importance de cette couverture. Par ailleurs la proportion de couverture végétale a un rôle plus important sur l'infiltrabilité des sols humides que sur l'infiltrabilité des sols secs : le coefficient de corrélation entre IL_IK_0 et C_VEG est en effet égal à 0,32 (sol sec) alors qu'il est égal à 0,54 pour IL_IK_80 (sol très humide).

Bêta (β), le coefficient de décroissance de l'intensité de pluie limite de ruissellement en fonction de IK , est quant à lui fortement corrélé positivement (0,84) avec le pourcentage de refus (éléments du sol de taille supérieure à 2 mm). Il est faiblement corrélé positivement avec le couvert végétal (0,38), négativement avec la pierrosité (-0,44) et avec la teneur en argile (-0,37). Le pourcentage de refus à 2 mm (REFUS) servira donc à expliquer les variations des paramètres β (BETA). On peut justifier le rôle joué par le pourcentage de refus à 2 mm dans la croissance du paramètre BETA par l'augmentation des éléments grossiers de petite taille (inférieure à 2 cm) dans la composition granulométrique du sol. Ces éléments grossiers, généralement imperméables, contribuent à limiter la capacité de stockage hydrique du sol, donc à augmenter son humidité pour une même valeur de l'indice des pluies antérieures (IK). Ils contribuent également à limiter sa capacité d'infiltration.

La quantité de pluie utile stockée à surface ou dans le sol avant ruissellement pour un indice $IK = 40$ mm (B_40) est corrélée positivement avec le type de couverture végétale (0,66) et négativement avec le pourcentage de sol nu. Elle est fortement corrélée négativement avec la teneur en carbonate de calcium (CACO3) mais cette corrélation ne peut servir que pour les sols carbonatés. L'effet du type de couverture végétale sur la valeur de la pluie utile stockée avant ruissellement s'explique bien en considérant les valeurs de la variable descriptive du couvert, laquelle croît de la valeur 1 pour le pâturage (couverture herbacée) à la valeur 3 pour le *matorral*-arboré. La couverture

arbustive et arborée contribue en effet à augmenter la rétention superficielle de l'eau par l'effet d'interception des végétaux. Pour l'ensemble des parcelles, nous utiliserons comme variables explicatives le pourcentage de sol nu (S_NU) et le type de couverture végétale (T_COUV).

9.2. A l'échelle des bassins versants

9.2.1. Données hydrologiques et descriptives

Les bassins versants expérimentaux sont au nombre de sept. Deux critères principaux ont servi à sélectionner ces bassins : les différents substrats géologiques et l'organisation morpho-pédologique plus ou moins complexe des bassins versants (Cf. chapitre 5, paragraphe 5.2.1).

Selon la position de la retenue par rapport à son impluvium, trois types de systèmes morpho-lithologiques séquentiels ont été retenus comme représentatifs du milieu physique du ranch (Cf. chapitre 5) :

- ♦ **un système séquentiel unitaire** composé par le versant d'un relief (le bassin versant de El Viejo sur rhyolite et le bassin versant de Oso Negro sur conglomérats basaltiques),
- ♦ **un système séquentiel binaire** comprenant un versant suivi d'un glacis d'épandage (le bassin versant de El Molino sur basalte et les bassins versants de Carboneras et El Muerto sur calcaire),
- ♦ **un système séquentiel ternaire**, constitué d'une succession versant - glacis - zone d'accumulation colluvio-alluviale (relief de commandement rhyolitique pour le bassin versant de El Tullido et relief calcaire pour le bassin versant Pastelero).

Le fonctionnement hydrologique des bassins versants est décrit par six variables explicatives du ruissellement déterminées au chapitre 8 :

- le coefficient d'écoulement annuel (C_ANNU) calculé avec la pluie totale annuelle,
- le coefficient d'écoulement saisonnier (C_SAISON), en ne considérant que la période pluvieuse estivale allant de juin à octobre,
- le coefficient d'écoulement maximal observé (C_MAX),
- l'intensité de pluie limite de ruissellement au pas de temps de 30 mn (IL_IK_0) pour la valeur zéro de l'indice des pluies antérieures IK,
- l'intensité de pluie limite de ruissellement au pas de temps de 30 mn pour une forte valeur de l'indice IK (IL_IK_80),
- la valeur du coefficient de décroissance exponentielle de l'intensité limite de ruissellement en fonction de l'indice IK (BETA).

Les caractéristiques physiographiques des bassins versants sont décrites par un ensemble de 28 variables qui peuvent être regroupées en variables physiques et biotiques, descriptives de la végétation.

Variables physiques

- Quatre types de pentes exprimées en pourcentages caractérisent les différentes unités morphologiques des bassins versants : les reliefs avec des pentes supérieures à 20 % (PE_SU_20), les collines avec des pentes comprises entre 10 et 20 % (PE_10_20), les glacis aux pentes comprises entre 5 et 10 % (PE_5_10) et les zones colluvio-alluviales avec des pentes comprises entre 3 et 5 % (PE_3_5).
- Les formations géologiques ont été associées en cinq groupes : l'association rhyolite - dacite - toba (RY_DA_TO), le groupe des colluvions et des alluvions (COL_ALU) et les trois groupes formés par les conglomérats basaltiques (CGBA), le basalte (BS) et les calcaires (CAL).
- Quatre types de variables décrivent les caractéristiques du sol : la profondeur, la texture, la pierrosité et l'absence ou la présence d'accumulation calcaire (CROUTE).
 - ♦ La variable profondeur différencie les sols squelettiques (PF_SQ), les sols de profondeur inférieure à 30 cm (PF_30), les sols de profondeur comprise entre 30 et 50 cm (PF_30_50) et les sols de profondeur supérieure à 50 cm (PF_50).
 - ♦ Quatre variables décrivent les associations texturales des sols : les textures sablo-limoneuse et limoneuse-sableuse (TX_SL_LS), les textures limono-sablo-argileuse et équilibrée (TX_LSA_EQ), les textures limono - argileuse et argileuse (TX_LA_A) et la variable ROCHE qui décrit l'affleurement de la formation géologique.
 - ♦ La pierrosité est prise en compte en considérant trois niveaux d'occupation volumique des cailloux dans le volume total du sol : une pierrosité faible, inférieure au 25 % du volume total du sol (PIE_1), une pierrosité moyenne de 25 à 50 % (PIE_2) et une pierrosité supérieure à 50 % du volume total du sol (PIE_50).
 - ♦ L'accumulation calcaire apparaît sous deux formes (chapitre 5) : la croûte dure consolide et l'encroûtement tendre. Nous ne considérerons ici que la présence (CROUTE) ou l'absence (S-CROUTE) d'accumulation calcaire, sans distinguer ses deux formes.

Variables biotiques descriptives de la végétation

- Les différents types de végétation sont décrits par : une association des végétations arbustive buissonnante et arborée (MAT_ARB), une végétation xérophile à plantes grasses (SUCUL) et une végétation herbacée (HERB).
- Au niveau de la surface du sol, trois taux de couverture végétale ont été considérés : un taux de couverture au sol compris entre 75 et 100 % (CO_75_100), un taux de couverture compris entre 50 et 75 % (CO_50_75) et un taux de couverture inférieur à 50 % (CO_IN_50).

Toutes ces variables sont présentées pour chaque bassin versant à l'annexe IX.3.

9.2.2. Résultats de l'ACP

Pour donner la même importance aux différentes variables, nous avons rentré les données centrées réduites dans les matrices de corrélations. L'ACP a été réalisée en considérant l'ensemble des variables et des observations. Le tableau 9.2. montre les coefficients de corrélation et leurs carrés entre chacune des variables et les axes principaux. Les figures 9.2 (A) et (B) présentent les projections des variables sur les plans définis par les axes principaux 1-2, et 2-3 de l'ACP.

Tableau 9.2. Coefficients de corrélation des variables des bassins versants par rapport aux axes principaux de l'ACP.

Axes Principaux	Coefficients de Corrélation				Coefficients de Corrélation au Carré				Somme
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Variable									
C_ANNU	-0,90	-0,22	0,24	0,18	0,81	0,05	0,06	0,03	0,94
C_SAISON	-0,89	-0,25	0,26	0,10	0,80	0,06	0,07	0,01	0,93
C_MAX	-0,89	-0,20	0,31	-0,06	0,79	0,04	0,10	0,00	0,93
IL_IK_0	0,89	0,34	0,21	0,01	0,80	0,11	0,04	0,00	0,95
IL_IK_80	0,87	0,34	0,01	0,19	0,76	0,12	0,00	0,04	0,91
BETA	-0,91	-0,23	-0,07	-0,24	0,82	0,05	0,01	0,06	0,94
RY_DA_TO	-0,20	-0,64	-0,48	-0,52	0,04	0,41	0,23	0,27	0,96
BS	0,69	-0,11	0,05	0,49	0,48	0,01	0,00	0,24	0,73
CGBA	0,39	0,68	-0,05	-0,29	0,15	0,46	0,00	0,09	0,70
CAL	-0,46	-0,14	0,83	0,11	0,21	0,02	0,70	0,01	0,94
COL_ALU	-0,83	0,30	0,01	0,42	0,69	0,09	0,00	0,17	0,95
PE_SU_20	-0,32	-0,77	0,25	-0,29	0,10	0,59	0,06	0,08	0,83
PE_10_20	0,84	0,47	0,00	-0,01	0,71	0,22	0,00	0,00	0,93
PE_5_15	-0,57	0,29	-0,36	0,49	0,33	0,09	0,13	0,24	0,78
PE_3_5	-0,44	0,15	0,20	-0,48	0,20	0,02	0,04	0,23	0,49
CROUTE	-0,72	0,59	0,01	0,30	0,52	0,35	0,00	0,09	0,95
S_CROUTE	0,72	-0,59	-0,01	-0,30	0,52	0,35	0,00	0,09	0,95
PF_SQ	0,14	0,64	0,15	-0,28	0,02	0,41	0,02	0,08	0,53
PF_30	-0,67	0,29	0,24	0,53	0,45	0,08	0,06	0,28	0,88
PF_50	-0,42	0,69	-0,38	-0,31	0,18	0,47	0,15	0,09	0,89
PF_SUP50	0,48	-0,72	-0,11	-0,09	0,23	0,52	0,01	0,01	0,76
ROCHE	-0,06	0,47	-0,49	-0,22	0,00	0,22	0,24	0,05	0,51
TX_SL_LS	-0,57	-0,38	-0,65	0,13	0,33	0,15	0,42	0,02	0,92
TX_LSA_E	0,39	0,40	0,65	-0,36	0,15	0,16	0,43	0,13	0,86
TX_LA_A	0,70	0,07	0,45	0,45	0,49	0,00	0,20	0,20	0,90
PIE_1	-0,51	0,08	0,30	-0,72	0,26	0,01	0,09	0,51	0,87
PIE_2	-0,54	0,80	0,18	-0,01	0,29	0,63	0,03	0,00	0,95
PIE_3	0,61	-0,67	-0,25	0,27	0,38	0,44	0,06	0,07	0,95
HERBE	-0,74	-0,16	0,37	-0,27	0,55	0,02	0,14	0,07	0,79
SUCUL	0,95	0,01	-0,02	-0,01	0,90	0,00	0,00	0,00	0,90
MAT_ARB	-0,72	0,17	-0,40	0,33	0,52	0,03	0,16	0,11	0,82
CO75_100	0,13	-0,37	0,87	0,20	0,02	0,13	0,76	0,04	0,95
CO_50_75	0,06	0,75	-0,32	-0,23	0,00	0,57	0,10	0,05	0,73
COINF_50	-0,20	-0,65	-0,41	0,12	0,04	0,42	0,17	0,01	0,64
Inertie Totale %	39,7	21,5	13,2	10,0					

Définition des axes principaux de l'ACP

Le tableau 9.2 montre que le premier axe de l'ACP mobilise 40 % de l'inertie totale du nuage de points, tandis que l'axe 2 en mobilise 22 % et l'axe 3 seulement 13 %. Un examen plus détaillé du tableau 9.2 et de ses représentations graphiques (figures 9.3 A et B) permet de caractériser les trois premiers axes de l'ACP :

- ♦ **l'axe 1** caractérise l'importance de l'écoulement avec une opposition entre le coefficient annuel d'écoulement (C_ANNU) et l'intensité de pluie limite d'infiltration (IL_IK_0 et IL_IK_80);
- ♦ **l'axe 2** est caractérisé principalement par l'opposition de la pente supérieure à 20 % (PE_SU_20) et de la couverture végétale comprise entre 50 et 75 % (CO_50_75);
- ♦ **l'axe 3** est associé à la proportion de couverture végétale comprise entre 75 et 100 % (CO_75_100) et à la formation géologique de calcaire (CAL), toutes les deux opposées à l'association des textures sablo-limoneuse et limono - sableuse (TX_SL_LS).

Le premier axe définit donc les variables qui peuvent favoriser ou empêcher l'écoulement. Les variables qui favorisent l'écoulement sont donc la formation géologique colluvions – alluvions (COL_ALU), la présence de croûte calcaire (CROUTE) et les sols de profondeur inférieure à 30 cm (PF_30). Les végétations herbeuse et arbustive - buissonnante ou arborée (MAT_ARB) favorisent aussi l'écoulement. Les variables physiographiques qui limitent l'écoulement sont la formation géologique des basaltes (BS), associée à la présence d'une végétation xérophile à plantes grasses (SUCUL) les sols aux textures limono - argileuse et argileuse (TX_LA_A) et, d'une manière moins évidente, la présence d'une pierrosité de niveau 3 (PIE3), plus de 50 % de volume des cailloux du volume total du sol).

Sur le deuxième axe, se retrouvent associées les variables suivantes : la couverture végétale de 50 à 75 % (CO_50_75), les sols de profondeur de 30 à 50 cm (PF_50), les sols squelettiques (PF_SQ), la formation géologique des conglomérats basaltiques (CGBA) et la pierrosité de niveau 2 (PIE_2). En opposition à ces variables sont associés la couverture végétale inférieure à 50 % (COIN_50), la pente supérieure à 20 % (PE_SU_20), la pierrosité de niveau 3 (PIE_3), les sols de profondeur supérieure à 50 cm (PF_SUP50) et la formation géologique associant rhyolite, dacite et toba (RY_DA_TO).

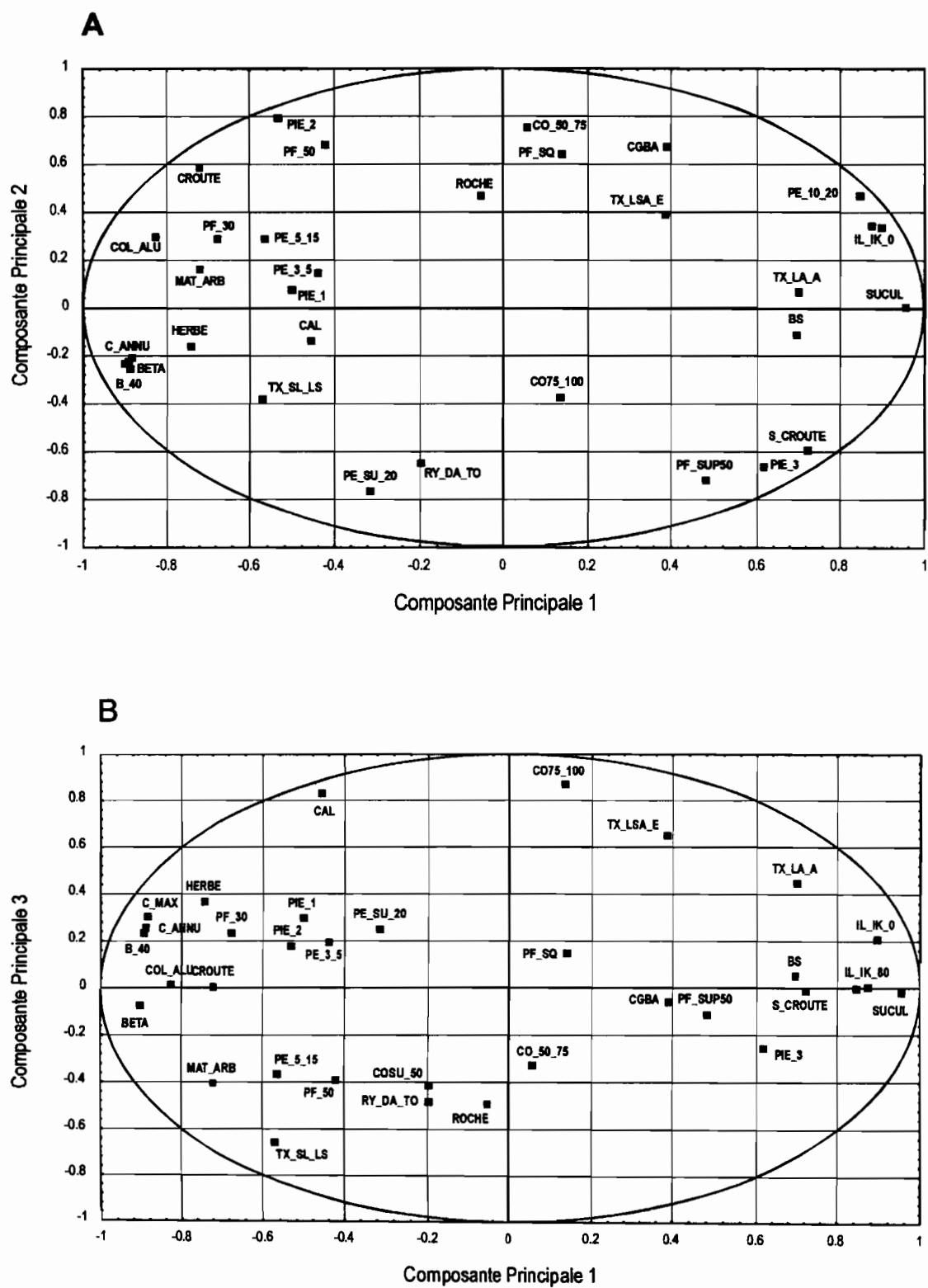


Figure 9.3. Représentation des variables caractéristiques des bassins versants sur le plan des axes 1 et 2 (A) et 1 et 3 (B).

Sélection des variables descriptives

En ce qui concerne les variables descriptives des bassins versants, plusieurs d'entre elles peuvent être corrélées. Nous avons donc placé sur l'annexe IX.4 les coefficients de corrélation entre couples de variables descriptives. L'examen de ce tableau permet de constater de bonnes corrélations entre les variables suivantes :

- Les colluvions et les alluvions sont corrélées à la présence de croûte calcaire (0,94), à la profondeur inférieure à 30 cm (0,89) et à la végétation arbustive buissonnante et arborée (0,85). L'association entre colluvions-alluvions et croûte calcaire est due à leur présence simultanée sur les bassins versants Pastelero et El Tullido. Sur le bassin Pastelero, l'existence d'un relief de commandement calcaire explique la présence de carbonate de calcium en aval sur les versants. Par contre, aucun relief de commandement calcaire n'existe sur le bassin de El Tullido. Pour l'instant, aucune explication définitive n'a pu être fournie à la présence de croûte calcaire sur des roches qui sont dépourvues de carbonate de calcium. L'association entre la formation colluvions-alluvions et la profondeur des sols inférieure à 30 cm semble être une caractéristique forte de cette formation dans le ranch Atotonilco, de même que l'existence d'un couvert végétal arbustif et arboré sur cette formation géologique. Finalement, il est possible d'éliminer des variables descriptives la présence de croûte (CROUTE), et son absence (S_CROUTE), la profondeur des sols inférieure à 30 cm (PF_30) et le couvert végétal arbustif et arboré (MAT_ARB) au profit de la formation géologique des alluvions et colluvions (COL_ALU).
- Pour les autres formations géologiques on note l'association entre les basaltes et la teneur du sol en argiles (coefficient de corrélation de 0,74) et la formation végétale xérophile à plantes grasses (cactées) mais avec un coefficient de corrélation nettement plus faible (0,57). On note également l'association entre les conglomérats basaltiques, les sols squelettiques (coefficient de corrélation de 0,93) et la formation végétale xérophile à plantes grasses avec sensiblement le même coefficient de corrélation que pour les basaltes (0,52). On note enfin l'association entre les formations géologiques rhyolitique et calcaire avec les pentes fortes, supérieures à 20 % : coefficients de corrélation respectifs de 0,58 et 0,47.

En conclusion de cette analyse des variables descriptives sur l'échantillon des bassins versants expérimentaux, sans formation alluviale ou colluviale, on peut retenir la présence de cactus sur les formations basaltiques, basalte et conglomérat basaltique, la position des formations calcaires et rhyolitiques sur les sommets et l'existence de sols argileux sur les basaltes. On pourra donc éliminer les variables descriptives suivantes : PF_SQ, TX_LA_A, SUCUL et PE_SU_20.

La bonne relation entre la végétation xérophile à plantes grasses et les sols de texture argileuse est due à ce que ces types de sols peuvent retenir l'eau plus longtemps. Ce type de végétation a la capacité d'extraire l'humidité des sols à de très hautes pressions (35 à 40 bars). Cette

végétation ne se développe pas sur sol à croûte calcaire. Elle se développe bien sur des sols caillouteux et des pentes douces (10 à 20 %).

Sélection des variables explicatives de l'écoulement

Comme pour les parcelles expérimentales, nous avons éliminé la variable IL_IK_80 dans le groupe des variables caractéristiques de l'écoulement à l'échelle des bassins versants. Sur la matrice de corrélation (annexe IX.4), le coefficient annuel d'écoulement (C_ANNU), le coefficient saisonnier (C_SAISON) et le coefficient maximal d'écoulement (C_MAX) sont fortement corrélés entre eux. Ces trois paramètres présentent aussi les mêmes coefficients de corrélation avec les autres variables, de telle sorte que nous n'avons conservé que le coefficient d'écoulement annuel pour représenter l'aptitude des bassins au ruissellement. Celles-ci se réduisent au nombre de trois : les variables IL_IK_0, C_ANNU et ALPHA.

Par ailleurs, le coefficient de régression relatif à PUIL dans le modèle stochastique et le paramètre E, associé à PUIL dans le modèle déterministe quadratique, sont bien corrélés au coefficient annuel d'écoulement (figure 9.4) de telle sorte qu'il est possible de conserver le coefficient annuel d'écoulement comme variable explicative principale du ruissellement.

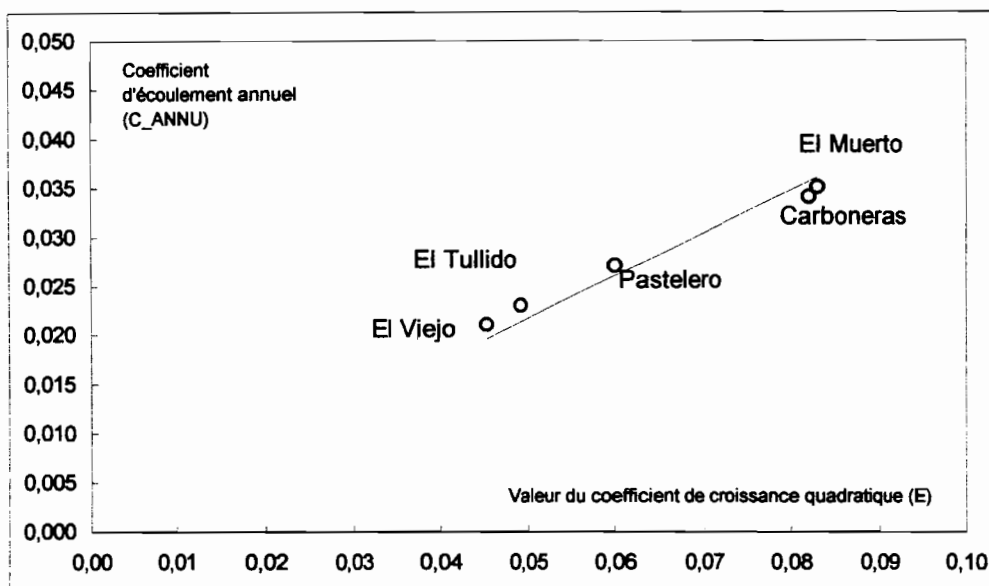


Figure 9.4. Relation entre le paramètre E, associé à la variable PUIL dans le modèle déterministe quadratique, et le coefficient annuel d'écoulement des bassins versants.

En ce qui concerne le paramètre F, constante du modèle déterministe quadratique, sa valeur est nulle pour le bassin Pastelero, très faible pour le bassin El Tullido et faible pour les autres bassins versants. Ainsi, pour une pluie utile de 10 mm, son influence n'excède pas 10 % de la valeur de la lame ruisselée du bassin versant El Muerto, pour lequel F a une valeur significativement plus forte que pour les autres bassins. Nous ne chercherons donc pas à expliquer ce paramètre par les variables descriptives des bassins versants. Nous retiendrons simplement que sa valeur est nulle pour

les bassins versants avec une forte proportion d'alluvions et de colluvions (Pastelero 68 % et El Tullido 43 %) et faible pour les autres bassins versants (-0,02 à 0,04).

Ayant réalisé une première sélection entre les variables descriptives des bassins versants d'une part et les variables hydrologiques d'autre part, nous allons maintenant chercher à expliquer les trois variables hydrologiques, caractérisant le ruissellement des bassins versants, à partir des 19 variables restantes.

Sur la matrice de corrélation (annexe IX.4), le coefficient annuel d'écoulement apparaît bien corrélé avec les formations géologiques des colluvions - alluvions (0,78) et calcaire (0,71), ainsi que la végétation herbeuse (0,75). Il apparaît bien corrélé négativement avec la végétation xérophile à plantes grasses (-0,87) et plus faiblement avec les basaltes (-0,58) et le conglomérat basaltique (0,53). Cette corrélation négative du coefficient annuel d'écoulement avec la végétation xérophile à plantes grasses (cactées) est en relation directe avec les deux autres car nous avons montré précédemment l'exclusive préférence des cactus pour les formations basaltiques. De cette analyse on retiendra donc l'influence capitale des formations géologiques et celle des formations végétales, principalement de la végétation herbeuse qui favorise le ruissellement et de la végétation xérophile à plantes grasses qui le défavorise par son association aux basaltes et aux conglomérats basaltiques.

Sur le même tableau de l'annexe IX.4, l'intensité limite de ruissellement pour $IK = 0$ (début de saison des pluies) est fortement corrélée positivement avec la végétation xérophile à plantes grasses (0,89). Elle est plus faiblement corrélée positivement avec les sols de texture limono - sablo - argileuse et équilibrée (0,63). Elle est bien corrélée négativement avec la teneur en limon (-0,81) et plus faiblement avec le couvert herbacé (-0,66). La bonne corrélation positive du paramètre IL_IK_0 avec la présence des cactus est en relation directe avec la bonne corrélation négative entre le coefficient annuel d'écoulement et cette formation végétale. Cette corrélation ne constitue donc pas une nouvelle information sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Par contre, la corrélation de IL_IK_0 avec la granulométrie des sols, positive avec la texture équilibrée (TX_LSA_E), négative avec la texture sablo-limoneuse (TX_SL_LS), constitue une information intéressante qu'il est possible d'exploiter pour mieux modéliser le comportement hydrologique des bassins. En ce qui concerne la corrélation négative de IL_IK_0 avec le couvert herbacé, elle est difficile à expliquer. On peut penser en effet que plus le couvert végétal herbeux est développé, plus la capacité du sol à l'infiltration est forte. Malheureusement, à l'heure actuelle, nous ne disposons pas d'étude précise sur le rôle du couvert herbacé dans la capacité des sols à l'infiltration. Or, ce couvert croît de manière plus ou moins forte au cours de la saison des pluies, en relation avec la fréquence des épisodes pluvieux. En outre, les pluies de printemps peuvent favoriser son développement avant la saison des pluies, comme ce fut le cas au début de l'année 1997. Faute d'informations plus précises sur le rôle du couvert herbacé, force est de constater l'effet négatif du couvert végétal herbacé sur l'infiltration des sols secs à l'échelle des bassins versants. Cet effet pourrait s'expliquer en considérant le tassement préférentiel des sols dû à la fréquentation des mêmes pâturages par les bovins depuis plus de 70 ans.

Bêta, le coefficient de décroissance de l'intensité de pluie limite de ruissellement en fonction de IK, est quant à lui corrélé positivement (0,74) avec la végétation herbeuse et les sols de texture sablo - limoneuse et limoneuse - sableuse (0,68). Il apparaît fortement corrélé négativement avec la végétation xérophile à plantes grasses (-0,87) et les formations basaltiques (-0,82). Cette dernière observation confirme la très forte aptitude à l'infiltration des sols sur basaltes et conglomérats basaltiques, laquelle reste très élevée, même pour des sols très humectés. Le rôle négatif du couvert herbacé sur l'infiltration des sols à l'échelle des bassins versants se trouve ici confirmé, de même que la texture sablo-limoneuse et limono-sableuse. Les mêmes variables descriptives (HERBE, TX_SL_LS et SUCUL) expliquent donc, à l'échelle des bassins versants, les variations des paramètres IL_IK_0 et BETA.

9.3. Conclusion.

Après analyse en composantes principales des facteurs physiques et phytoécologiques expliquant les paramètres hydrologiques introduits dans les modèles globaux déterministes, il est maintenant possible d'en extraire quelques conclusions intéressantes qui seront utilisées dans le processus de transposition des modèles à l'échelle du ranch Atotonilco.

Au niveau des parcelles expérimentales :

- ◆ la pente moyenne de l'écoulement (PEN_ECOU) est corrélée positivement avec la teneur du sol en carbonate de calcium et la pierrosité du sol de taille inférieure à 2 cm. Elle est corrélée négativement avec la teneur du sol en carbone, elle-même très corrélée positivement avec la pente des parcelles.
- ◆ l'intensité de pluie limite du ruissellement pour un sols sec au pas de temps de 10 minutes (IL_IK_0) est corrélée positivement avec la teneur du sol en argiles et avec le type de couvert végétal (couvert arbustif et arboré).
- ◆ le coefficient de décroissance exponentielle (BETA) de l'intensité de pluie limite du ruissellement en fonction de l'indice des pluies antérieures (IK) est corrélé positivement avec la teneur en éléments grossiers du sol (taux de refus à 2 mm).
- ◆ la quantité de pluie stockée à la surface du sol avant ruissellement (B_40, pour IK=40 mm) est corrélée positivement avec le type de couvert végétal, négativement avec le taux de recouvrement en sol nu et la teneur du sol en carbonate de calcium.

Ces résultats sont intéressants car ils montrent bien d'une part le rôle du couvert végétal, que nous retrouverons à l'échelle des bassins versants, et d'autre part le rôle du carbonate de calcium, dont la teneur dans le sol contribue à accroître de manière très significative le ruissellement. La forte corrélation négative entre la pente moyenne de l'écoulement et la teneur du sol en carbone est également très intéressante à prendre en considération. Cependant, il sera difficile de le faire à l'échelle des bassins versants, faute de mesures systématiques de cette caractéristique pédologique.

Nous retiendrons donc de l'analyse en composantes principales à l'échelle des parcelles expérimentales la nécessité de prendre en considération l'existence de massifs calcaires sur les bassins versants, ces massifs calcaires étant susceptibles d'alimenter les bas versants en carbonate de calcium.

A l'échelle des bassins versants :

- ♦ le coefficient annuel d'écoulement (C_ANNU) est corrélé positivement avec les taux de recouvrement de deux formations géologiques : les alluvions-colluvions et les calcaires ; il est également corrélé positivement avec le taux de recouvrement de la formation végétale herbeuse, négativement avec le taux de recouvrement de la formation végétale xérophile à plantes grasses (cactées), associée aux formations basaltiques.
- ♦ l'intensité de pluie limite du ruissellement pour un sol sec au pas de temps de 30 minutes (IL_IK_0) est corrélé positivement avec le taux de recouvrement de la végétation xérophile à plantes grasses et le taux de recouvrement des sols aux textures limono-sablo-argileuse et équilibrée ; elle est corrélée négativement avec les taux de recouvrement de la végétation herbacée et des sols aux textures sablo-limoneuse et limono-sableuse ;
- ♦ inversement au précédant, le coefficient de décroissance exponentielle (BETA) de l'intensité de pluie limite du ruissellement en fonction de l'indice des pluies antérieures (IK) est corrélé positivement avec le taux de recouvrement de la végétation herbeuse et avec le taux de recouvrement des sols aux textures sablo-limoneuse et limono-sableuse ; il est corrélé négativement avec le taux de recouvrement en basaltes et conglomérats basaltiques et avec le taux de recouvrement de la végétation xérophile à plantes grasses.

Le type de couvert végétal semble donc jouer un rôle important sur le ruissellement à l'échelle des bassins versants puisqu'il intervient de la même manière sur les trois paramètres hydrologiques pour accroître l'écoulement (c'est le rôle de la végétation herbeuse), ou pour le réduire (c'est le rôle de la végétation xérophile à plantes grasses). Cependant, le type de couvert végétal est plus ou moins fortement associé aux formations géologiques. Ainsi, la végétation xérophile à plantes grasses est associée aux basaltes et conglomérats basaltiques mais ne l'est pas aux alluvions et colluvions. Le matorral arbustif et arboré est exclusivement associé aux alluvions et colluvions. La végétation herbeuse est plus particulièrement associée aux calcaires. Pour expliquer les paramètres hydrologiques, il n'est donc pas nécessaire de maintenir deux critères qui sont étroitement associés, même s'ils ne le sont qu'imparfaitement.

Par ailleurs, les textures des sols semblent également jouer un rôle secondaire important sur les paramètres IL_IK_0 et BETA, plus particulièrement les textures sablo-limoneuse et limono-sableuse d'une part, plutôt associées aux formations géologiques éruptives acides, et les textures limono-sablo-argileuse et équilibrée d'autre part, qui ne paraissent associées à aucune formation géologique. La texture des sols pourrait donc être un critère complémentaire intéressant pour expliquer le comportement hydrologique des bassins versants.

En définitive, la prise en considération de l'ensemble des résultats des analyses en composantes principales nous conduit à retenir pour notre classification hydrologique des bassins versants 2 critères fondamentaux : la formation géologique et la pente. La formation géologique joue en effet un rôle direct par les taux de recouvrement en alluvions, colluvions et calcaires, un rôle indirect par ses associations aux formations végétales ou aux textures des sols. La pente du terrain joue un rôle indirect par son association avec la teneur du sol en carbone. On peut donc estimer les paramètres hydrologiques des bassins de la manière suivante par la prise en considération de ces deux critères :

- ♦ pour les bassins versants à forte pente sur matériaux éruptifs acides, rhyolite et toba (El Viejo), $\beta = 0,02$, $IL0 = 23 \text{ mm/h}$, $C\_ANNU = 0,021$;
- ♦ pour les bassins versants à forte pente sur matériaux calcaires (El Muerto) ou sur matériaux éruptifs acides et calcaires (Carboneras), $\beta = 0,02$, $IL0 = 29 \text{ mm/h}$, $C\_ANNU = 0,034$.
- ♦ pour les bassins versants aux pentes moyennes sur basalte (Molino) et sur conglomérats basaltiques (Oso Negro), $\beta = 0,1$, $IL0 = 60 \text{ mm/h}$, $C\_ANNU = 0,005$;
- ♦ pour les bassins versants à pente moyenne à faible sur matériaux éruptifs acides et matériaux détritiques associant alluvions et colluvions (El Tullido), $\beta = 0,01$ et $IL0 = 20 \text{ mm/h}$, $C\_ANNU = 0,023$;
- ♦ pour les bassins versants à pente moyenne à faible principalement sur matériaux détritiques associant alluvions et colluvions, secondairement sur d'autres types de matériaux (Pastelero), $\beta = 0,02$ et $IL0 = 20 \text{ mm/h}$, $C\_ANNU = 0,027$;

Deux autres critères complémentaires pourraient être pris en considération : la texture des sols et le taux de recouvrement du couvert végétal mais il est difficile de le faire dans une modélisation globale à l'échelle des bassins versants et, de plus, le couvert végétal varie au cours de la saison pluvieuse et d'une année à l'autre sans que nous puissions pour l'instant nous appuyer sur un suivi de sa densité de recouvrement.

CHAPITRE 10

VALIDATION, TRANSPOSITION, EXTRAPOLATION

Nous avons analysé au chapitre 8 les données pluviométriques et hydrométriques recueillies à l'échelle des sept bassins versants sélectionnés à l'intérieur du ranch Atotonilco et nous avons retenu le modèle hydrologique global quadratique comme le plus adéquat pour la reconstitution des lames ruisselées, événement par événement. Ce modèle comprend cinq paramètres : 3 paramètres attachés à la détermination de la pluie utile et 2 autres paramètres liés au modèle quadratique qui lie la pluie utile à la lame ruisselée. Les trois premiers paramètres ont été déterminés à partir des averses sans ruissellement collectées au cours des années 1996 et 1997. Par contre, les deux autres paramètres ont été déterminés par calage du modèle quadratique aux seules observations de l'année 1996, année suffisamment pluvieuse pour avoir connu au moins une dizaine de crues par bassin versant si l'on excepte les bassins Oso Negro et Molino qui ne ruissellent pas. Pour valider le calage de ces deux paramètres, nous allons maintenant utiliser les observations réalisées en 1997 et 1998 sur l'ensemble des bassins versants expérimentaux.

Après validation du modèle global quadratique pour les sept bassins versants expérimentaux, nous chercherons à transposer ce modèle à l'échelle du ranch Atotonilco en utilisant les résultats obtenus au chapitre 9, où nous avons analysé les relations entre les paramètres hydrologiques et les variables physiques et phytoécologiques des bassins versants. Pour réaliser cette transposition, nous décrirons l'ensemble des bassins versants situés en amont de petits barrages à l'intérieur du ranch, puis nous établirons une typologie des bassins versants que nous croiserons avec celle des bassins versants expérimentaux.

Nous terminerons ce chapitre en utilisant le modèle global quadratique hors de la période des trois années d'observations intensives et en adaptant son usage à la série de 13 années de pluies journalières collectées à la station Atotonilco de 1971 à 1983. Nous constituerons ainsi pour 3 bassins versants des séries d'apports annuels que nous caractériserons par leurs valeurs médianes, quinquennales sèches et humides, décennales sèches et humides.

10.1. Validation

Dans le chapitre 8, les essais de modélisation hydro-pluviométrique (tableau 8.12) ont montré que les modèles globaux quadratiques, de types déterministe ou stochastique, s'ajustent mieux que les modèles linéaires.

Rappelons ici que le modèle global quadratique utilisé met en relation la lame ruisselée journalière ou événementielle (L_r) avec la pluie utile correspondante ($PUIL$) calculée à partir du hyétogramme de l'averse en éliminant toutes les séquences pluvieuses dont l'intensité (IP_i), au pas de temps de 30 minutes, est inférieure à l'intensité de pluie limite du ruissellement (IL) sur le même pas de temps. C'est un modèle à deux paramètres apparents (E et F) dans la relation $L_r = f(PUIL)$ et trois paramètres ($IL0$, α et β) utilisés pour le calcul de $PUIL$:

E est le coefficient de croissance quadratique,

F est la constante quadratique, fonction linéaire de IK dans le modèle stochastique,

$IL0$ est l'intensité de pluie limite du ruissellement pour un sol sec ($IK = 0$),

α est le coefficient de décroissance exponentielle de l'indice des pluies antérieures (IK),

β est le coefficient de décroissance exponentielle de IL en fonction de IK .

Les relations associant paramètres et variables sont les suivantes :

$$L_r = (E \cdot PUIL - F)^2 \quad 10.1$$

$$PUIL = \sum_i (IP_i \cdot \Delta t_i) \quad \text{où } \Delta t_i = 0,5 \text{ h et } IP_i > IL \quad 10.2$$

$$IL = IL0 \cdot e^{-\beta \cdot IK} \quad 10.3$$

$$IK_j = (IK_{j-1} + P_{j-1}) \cdot e^{-\alpha \cdot t_{j-1}^i} \quad 10.4$$

où P_{j-1} est la pluie du jour $j-1$,

IK_{j-1} est l'indice des pluies antérieures du jour $j-1$,

t_{j-1}^i est l'intervalle de temps exprimé en jours entre la pluie du jour $j-1$ et la pluie du jour j .

Le modèle ainsi constitué comprend donc 5 variables explicatives et 5 paramètres. Le calage des paramètres α , β et $IL0$ a été largement développé dans le chapitre 8. Bien qu'à l'échelle des bassins la valeur 0,2 ou 0,3 aurait sans été plus adéquate, le paramètre α a été pris égal à 0,1 jour⁻¹ pour tous les bassins versants afin de conserver la même signification à la variable IK aux deux échelles d'observation : celle des parcelles expérimentales et celle des bassins versants. Les paramètres α et β varient selon les bassins versants et nous verrons dans le sous-chapitre suivant,

consacré à la transposition, comment déterminer ces paramètres en fonction des caractéristiques physiques et physiographiques des bassins.

Nous nous intéresserons ici à la détermination des paramètres E et F de la relation $L_r = f(PUIL)$ pour lesquels un premier calage du modèle quadratique a été réalisé à partir des données de l'année 1996. Ce calage est bien sûr tributaire des conditions de ruissellement de l'année 1996, lesquelles se caractérisent par une concentration des précipitations pendant la saison des pluies estivales, en août, septembre et octobre (Cf. tableau 6.2). En 1996, l'abondance des pluies a créé des conditions très favorables au ruissellement sur la plupart des bassins versants. A l'opposé, l'année 1997 (tableau 6.2) est marquée par de nombreuses pluies hivernales et printanières et une faiblesse exceptionnelle des pluies du mois d'août (29 mm). Quant à l'année 1998, elle est normale en août mais déficitaire en juillet et septembre. Avec les années 1997 et 1998 nous disposons donc d'un éventail assez large de situations pluviométriques devant permettre, à la fois, de valider les calages réalisés avec les données de l'année 1996 et de préciser les fluctuations des paramètres E et F.

Les données de base relatives au calage et à la validation du modèle quadratique reliant la lame ruisselée et la pluie utile sont consignées dans le tableau 10.1 pour le bassin El Viejo et aux annexes X.1.1 à X.1.4 pour les bassins versants El Muerto, Carboneras, El Tullido et Pastelero. La figure 10.1 correspond au tableau 10.1. Les autres figures sont associées à leurs tableaux dans les annexes X.1.1 à X.1.4.

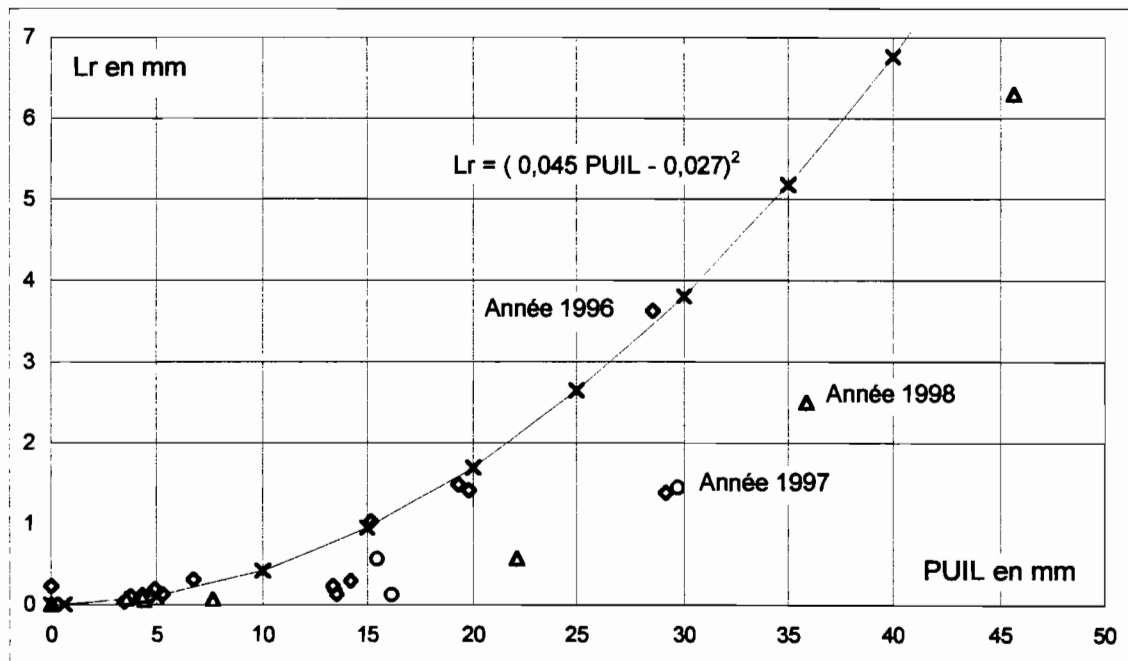


Figure 10.1. Relations entre la lame ruisselée (Lr) et la pluie utile (PUIL) sur le bassin versant El Viejo.

Tableau 10.1. Données de base pour le calage du modèle global quadratique sur le bassin versant El Viejo.

Date	Pluie	Pluie utile	IL	IK	Imax en 30 mn	Lame ruisselée	Modèle quadratique	
	Moyenne	PUIL					F/E	E
	mm	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm	mm ^{0.5}
11-07-96	47,1	28,5	16,2	17	74	3,62	6,66	0,087
07-08-96	24,2	19,3	18	11	43	1,48	7,74	0,105
13-08-96	26,4	14,2	14,2	23	29	0,29	5,32	0,061
14-08-96	23,5	19,8	9	46	40	1,41	0,8	0,062
20-08-96	30,9	29,1	10,4	39	40	1,38	2,28	0,044
23-08-96	15,4	13,4	8,1	51	16	0,18	0	0,032
24-08-96	18,3	5,3	6,4	63	13	0,13	0	0,068
31-08-96	15,8	6,8	6,4	63	7	0,31	0	0,082
02-09-96	21	15,2	5,7	69	30	1,03	0	0,067
03-09-96	16,8	13,3	4,8	77	9	0,23	0	0,036
07-09-96	2,4	3,7	6,5	62	9	0,1	0	0,085
12-09-96	8,3	3,4	10	41	9	0,03	1,8	0,108
13-09-96	14,3	4,9	9	46	11	0,19	0,8	0,106
18-09-96	15,3	4,3	11	36	13	0,12	2,8	0,231
25-09-96	14,8	13,5	13,6	25	27	0,13	5	0,042
03-10-96	69,1	0	12	32	7	0,23	3,6	-
19-07-97	44,3	29,7	18	12	58	1,44	7,66	0,054
24-09-97	20,5	15,5	13	28	34	0,56	4,4	0,067
10-10-97	23,2	16,2	18	11	33	0,12	7,76	0,041
06-08-98	24,6	22,1	21	4	-	0,57	9,26	0,059
14-08-98	59,6	35,8	14,5	22	-	2,5	5,54	0,052
15-08-98	11	4,4	5,2	74	-	0,05	0	0,051
02-09-98	51	45,6	11,1	35	-	6,3	2,92	0,059
06-09-98	7,1	4,3	6,4	63	-	0,1	0	0,074
02-10-98	21,9	7,7	18,5	10	-	0,06	8,02	-
15-10-98	20	0	19	9	-	0	8,26	-
28-10-98	9,7	3,5	18	11	-	0,07	7,76	-

10.1.1. Validation du paramètre F

La relation 10.1 peut s'écrire : $Lr = \left[E \cdot \left(PUIL - \frac{F}{E} \right) \right]^2$ où $\frac{F}{E}$ correspond à la quantité

de pluie utile interceptée par le bassin versant avant le ruissellement.

Comme le montre le modèle stochastique (Cf. chapitre 8), le paramètre F dépend de l'état d'humectation des sols par le biais de l'indice des pluies antérieures IK. Pour l'année 1996 (tableau 10.1, annexes X.1.1 à X1.4), seules les crues de début de saison des pluies présentent des indices IK inférieurs à 20 mm. Pour les années 1997 et 1998, les crues de fin de saison pluvieuse présentent également des valeurs de cet indice inférieures à 20 mm, ce qui permet de mieux dégager le rôle de l'indice des pluies antérieures dans la définition du paramètre F, constante quadratique.

En ne considérant que les événements pour lesquels PUIL est inférieur à 15 mm, événements qui correspondent généralement à des pluies de faible intensité, on peut remarquer, pour la plupart des bassins versants, un net décalage entre les événements survenus en 1996 et les événements survenus en 1997 et 1998.

Pour les bassins versants El Viejo, Carboneras, El Tullido et Pastelero (tableau 10.1, annexes X.1.2 à X.1.4), on peut ainsi considérer que le paramètre $\frac{F}{E}$ s'annule pour $IK = 50$ mm et que sa valeur est égale à 8 mm pour $IK = 10$ mm, soit que $F = 8 / E$. Pour ces quatre bassins versants, on peut finalement adopter, pour des valeurs de IK inférieures à 50 mm, une décroissance linéaire du paramètre F en fonction de l'indice des pluies antérieures :

$$F = 10 \cdot E \cdot \left(1 - \frac{IK}{50}\right) \text{ pour } IK < 50 \text{ mm et } F = 0 \text{ pour } IK > 50 \text{ mm ou } IK = 50 \text{ mm}$$

Pour le bassin versant El Muerto (annexe X.1.1), l'écart entre les événements de l'année 1996 et ceux des années 1997 et 1998 pour des valeurs faibles de PUIL semble inexistant mais les événements avec un indice IK inférieur à 20 mm sont peu nombreux (annexe X.1.1). En s'appuyant sur ces seuls

événements, on peut cependant considérer que la paramètre $\frac{F}{E}$ est égal à 2 mm pour $IK = 10$ mm, de telle sorte que l'on peut adopter pour ce bassin la relation suivante entre le paramètre F et l'indice IK :

$$F = 2,5 \cdot E \cdot \left(1 - \frac{IK}{50}\right) \text{ pour } IK < 50 \text{ mm et } F = 0 \text{ pour } IK > 50 \text{ mm ou } IK = 50 \text{ mm}$$

10.1.2. Validation du paramètre E

En ce qui concerne le coefficient de croissance quadratique E , celui-ci varie pour chaque bassin versant entre une valeur minimale et une valeur maximale. Pour la plupart des bassins (Cf. tableau 10.1 et annexes X.1.1 à X.1.4), les valeurs les plus fortes de ce coefficient ($0,1$ à $0,2 \text{ mm}^{-1/2}$) se localisent au début du mois d'août de l'année 1996, pour une valeur faible de l'indice des pluies antérieures et les valeurs les plus faibles ($0,05$ à $0,08 \text{ mm}^{-1/2}$) se situent à la fin de la saison des pluies de l'année 1996, en 1997 et 1998.

Les bassins versants El Viejo et Carboneras semblent posséder des fonctionnements sensiblement identiques, de même que les bassins El Tullido et Pastelero. Celui de El Muerto se distingue des autres bassins par un comportement moyen (annexe X.1.1) valable pour les trois années avec cependant 2 crues nettement distinctes des autres en 1998 pour lesquelles $E = 0,059$ à $0,068$, 3 crues nettement plus fortes en 1996 et une en 1997. L'absence de pluviographe sur le bassin en 1998 et en 1997 laisse planer un doute sur les valeurs réelles de la pluie utile estimée à partir du pluviographe le plus proche, celui de Carboneras. On peut donc faire abstraction des 2 crues du 08/08 et du 02/09 qui se distinguent de l'échantillon par des valeurs plus faibles du coefficient E pour l'année 1998. Par contre, les trois crues de l'année 1996, pour lesquelles le coefficient E dépasse la valeur $0,1$, correspondent à des événements pluvieux qui suivent une première averse dans un

intervalle de temps d'environ 24 heures : 13 et 14 août; 23 et 24 août; 30 et 31 août. La seconde averse génère une crue dont le coefficient de croissance quadratique est nettement plus fort que celui de la crue du jour précédant.

Pour le bassin versant de El Muerto on peut donc adopter les valeurs suivantes du coefficient E de croissance quadratique :

- dans le cas général $E = 0,083 \text{ mm}^{-1/2}$,
- cas particulier pour la seconde averse suivant une première averse de plus de 10 mm : $E = 0,18 \text{ mm}^{-1/2}$.

Pour les autres bassins versants, en prenant les événements dont la lame ruisselée est supérieure à 0,5 mm et en éliminant la seconde crue lorsque les deux averses sont espacées de 24 heures et moins, on obtient les valeurs figurant au tableau 10.2.

Tableau 10.2 : Valeurs du coefficient de croissance quadratique E pour les crues non précédées par une averse la veille et dont la lame ruisselée est supérieure à 0,5 mm.

Période pluvieuse Bassins versants	Début août 1996		Saison 1996		Saison 1997		Saison 1998		E valeur moyenne
	n	E	n	E	n	E	n	E	
El Viejo	3	0,074	2	0,055	2	0,06	3	0,055	0,056
Carboneras	3	0,11	2	0,067	1	0,05	1	0,073	0,064
Pastelero	3	0,17	3	0,073	-	-	2	0,057	0,067
El Tullido	1	(0,47)	2	0,075	-	-	4	0,047	0,056

n : nombre d'événements; *E* : coefficient de croissance quadratique exprimé en $\text{mm}^{-1/2}$.

La valeur moyenne est calculée par pondération sans les événements survenus au début de la saison des pluies de l'année 1996 et sans les événements précédés par une averse de plus de 10 mm sur un intervalle de temps de moins de 24 heures.

La prise en compte des années 1997 et 1998 modifie sensiblement l'estimation du coefficient de croissance quadratique E car il semble que les crues survenues au début de la saison des pluies estivales de l'année 1996 aient bénéficié de conditions particulièrement favorables au ruissellement. En effet, au début du mois d'août 1996 les valeurs du coefficient E des premières crues sont assez nettement supérieures aux autres valeurs. On peut expliquer ces fortes valeurs par un faible développement du couvert végétal herbacé au début de l'année 1996, après une année 1995 particulièrement sèche : 257 mm à la station Atotonilco contre 427 mm en moyenne. Par contre, l'année 1997, jusqu'au mois d'août, très déficitaire, apparaît particulièrement favorable au développement de la végétation herbacée en raison des pluies de printemps ayant permis un développement précoce des plantes annuelles.

Comme pour le bassin versant de El Muerto, une mention particulière doit être faite aux crues précédées d'une averse de plus de 10 mm dans un intervalle de temps de moins de 24 heures et nous avons placé dans le tableau 10.3 les valeurs correspondantes du coefficient E.

Tableau 10.3. Valeurs du coefficient de croissance quadratique E pour les crues précédées par une averse de plus de 10 mm depuis moins de 24 heures.

Bassins	Averses espacées de 24 h		Averses espacées de quelques heures			E, valeur moyenne
	n	E en mm ^{0.5}	n	E en mm ^{0.5}	Dt	
El Viejo	3	0,072	-	-		0,056
Carboneras	3	0,092	1	0,32	1 h	0,064
Pastelero	3	0,12	3	0,12	3 h	0,074
El Tullido	3	0,12	1	0,27	3 h	0,056

Deux averses successives espacées de 24 heures font donc croître le coefficient E de manière plus ou moins forte. Les bassins versants Pastelero et El Tullido voient leurs coefficients de croissance quadratique prendre une valeur plus forte que celles des bassins Carboneras et El Viejo, ce dernier étant le moins sensible à ce phénomène. Pour des averses successives espacées de quelques heures, le coefficient E croît jusqu'à la valeur 0,30 mm^{-1/2}, pour les bassins Carboneras et El Tullido, ce qui ne semble pas être le cas pour le bassin Pastelero.

Pour valider l'utilisation des nouveaux paramètres du modèle quadratique, nous avons utilisé le critère de Nash (Nash 1969 ; Nash et Sutcliffe 1990) qui est de la forme :

$$CNash = 1 - \frac{\sum (Lc - Lo)^2}{\sum (Lo - \bar{L})^2}$$

où Lc est la lame ruisselée calculée,
Lo est la lame ruisselée observée,
 $\bar{L}$ est la moyenne des lames ruisselées observées.

Pour la seule année 1996 et pour les valeurs des paramètres E et F déterminés après calage puis validation, le critère de Nash prend les valeurs suivantes :

Bassin versants	Après calage	Après validation
El Muerto	0,88	0,86
Carboneras	0,94	0,95
El Viejo	0,56	0,72
El Tullido	0,30	0,44
Pastelero	0,58	0,82

La comparaison des valeurs avant et après la phase de validation permet de conclure à une amélioration, à l'exception du bassin El Muerto, de la plupart des ajustements au cours de cette phase, le principal intérêt de cette validation étant la prise en compte de l'ensemble des crues, quelles qu'aient été leurs conditions d'occurrence.

10.2. Transposition

Au chapitre 4, nous avons décrit l'ensemble du ranch Atotonilco en caractérisant son relief, ses formations géologiques, ses sols et son couvert végétal et au chapitre 5 les sept bassins versants ayant fait l'objet d'observations hydrologiques. En utilisant les conclusions du chapitre 9, nous allons maintenant nous efforcer d'établir les règles d'une transposition à l'échelle du ranch des modèles hydrologiques calés et validés à partir des données recueillies sur les bassins versants expérimentaux.

Pour définir les règles de la transposition, nous commencerons par établir des relations entre les paramètres du modèle global quadratique, après validation, et les variables descriptives des bassins versants sélectionnées au chapitre 9. Ces relations seront associées à une typologie de ces bassins analogue à celle que nous avons établie dans la conclusion du chapitre précédent. Puis nous localiserons et caractériserons, par leur relief, leurs formations géologiques et leurs formations végétales, tous les bassins versants alimentant une retenue artificielle à l'intérieur du ranch. Une nouvelle typologie sera alors définie, tenant compte de la diversité des conditions physiographiques des bassins versants à l'échelle du ranch. Les règles de la transposition pourront alors être définies par croisement entre les deux typologies et extension des relations entre paramètres hydrologiques et variables descriptives des bassins versants.

10.2.1. Relations entre paramètres hydrologiques et variables descriptives

Après validation, nous avons vu au sous-chapitre 10.1 que le modèle global quadratique comprend 5 paramètres :

- les paramètres α et β qui règlent respectivement les décroissances exponentielles de l'indice des pluies antérieures et de l'intensité de pluie limite du ruissellement (IL),
- le paramètre IL_0 , intensité de pluie limite du ruissellement pour un sol sec ($IK = 0$),
- la constante quadratique pour un sol sec (F_0)
- le coefficient de croissance quadratique (E) qui semble varier avec le développement du couvert herbacé et prendre des valeurs singulièrement fortes lorsque deux averses se succèdent dans un intervalle de temps inférieur à 24 heures.

Le paramètre α a été pris égal à 0,1 pour tous les bassins versants. Il n'a donc pas à être estimé. En ce qui concerne les paramètres β et IL_0 , nous avons vu dans la conclusion du chapitre 9 qu'ils pouvaient être déterminés en considérant une classification des bassins versants expérimentaux selon la pente de leurs versants et selon la nature des formations géologiques sous-jacentes.

Quant à l'estimation de la constante quadratique (F), nous avons adopté au sous-chapitre 10.1 une décroissance linéaire de ce paramètre entre une valeur maximale (F0) pour un indice des pluies antérieures égal à 0 (IK = 0) et une valeur minimale égale à 0 pour IK supérieur ou égal à 50 mm. D'autre part, nous avons considéré deux cas pour la détermination du paramètre F0/E :

- le cas du bassin versant d'El Muerto pour lequel F0/E = 2,5 mm,
- le cas des autres bassins versants ayant donné lieu à des ruissellements (El Viejo, Carboneras, Pastelero et EL Tullido) pour lesquels F0/E = 10 mm.

La taille du bassin El Muerto (0,15 km²) le différencie nettement des autres bassins versants (1 à 4 km²). N'ayant pas d'autres bassins expérimentaux de même taille avec des écoulements suffisamment nombreux, puisque les bassins Molino et Oso Negro n'ont pratiquement pas connu de ruissellement en 1996 et 1997, il est difficile de confirmer la valeur de 2,5 mm pour les bassins versants de petite taille, d'autant que pour les parcelles expérimentales, dont la superficie est de 60 m², les valeurs du paramètre B du modèle linéaire, qui correspond bien au paramètre F0/E du modèle quadratique, prend des valeurs comprises entre 6,5 et 9 mm. Il semble donc que le bassin versant d'El Muerto ait une prédisposition particulière au ruissellement pour de faibles pluies journalières, lesquelles correspondent en général à de faibles valeurs de la pluie utile (PUIL). Cette prédisposition au ruissellement pour de petites pluies, spécifique au bassin El Muerto, est probablement en relation avec une dégradation du couvert végétal herbacé dans la partie aval du bassin versant, dégradation qui met à nu les sols de bas versant. Ce type de dégradation n'étant pas très répandue dans le ranch Atotonilco, il ne semble pas nécessaire de prendre en considération le cas particulier du bassin de El Muerto en ce qui concerne la valeur du paramètre F0. Dans les opérations de transposition, nous prendrons donc, quelle que soit la superficie du bassin versant, lorsque celle-ci est inférieure à 4 km², la relation suivante pour déterminer le paramètre F :

$$F = 10 \cdot E \cdot \left(1 - \frac{IK}{50}\right) \text{ pour } IK < 50 \text{ mm et } F = 0 \text{ pour } IK > 50 \text{ mm.}$$

Pour la détermination du coefficient de croissance du ruissellement avec la pluie utile (E), nous avons récapitulé au tableau 10.4 les valeurs prises par ce paramètre pour les bassins versants ayant donné lieu à des ruissellements.

Tableau 10.4. Valeurs du paramètre E de croissance quadratique exprimées en mm^{-1/2}.

Bassins	El Muerto	Carboneras	Pastelero	El Viejo	El Tullido
Moyenne (Em)	0,083	0,064	0,067	0,056	0,056
Début août 1996 (Ed)	0,11	0,11	0,17	0,074	0,12
Averses espacées de 24 h (E24h)	0,18	0,092	0,12	0,072	0,12
Averses espacées de quelques heures	-	(0,32)	0,12	-	(0,27)

A l'examen du tableau 10.4, il apparaît une parenté de comportement entre les bassins versants Carboneras et Pastelero, dont la superficie est comprise entre 1 et 2 km², disposant de reliefs de commandement calcaires qui provoquent un encroûtement des versants. De même, il apparaît une parenté de comportement moyen entre les bassins versants El Viejo et El Tullido en totalité ou en partie sur matériaux éruptifs acides. Au début de l'année 1996 et pour des averses rapprochées, le second présente cependant une susceptibilité plus grande au ruissellement. Pour les averses espacées de moins de 24 heures, ce comportement spécifique apparente le bassin El Tullido au bassin Pastelero. Quant au bassin versant El Muerto, comme nous l'avons déjà signalé, il se distingue des autres par un comportement moyen nettement plus favorable au ruissellement.

Pour la détermination des valeurs du paramètre E, il semble finalement nécessaire de considérer trois éventualités et quatre types de bassins versants. En ce qui concerne les éventualités, nous distinguerons les événements précédés d'une averse de plus de 10 mm depuis moins de 24 heures (E24h), les événements de début de saison pluvieuse faisant suite à une année très déficitaire (Ed) et les événements les plus courants (Em) qui correspondent à la valeur moyenne de E. Quant aux types de bassins versants, il nous faut considérer la même typologie que pour la détermination des paramètres β et IL0 en distinguant un type supplémentaire pour tenir compte du comportement spécifique au bassin El Muerto : les bassins de superficie inférieure à 0,5 km² aux pentes fortes sur matériaux calcaires et détritiques. Nous proposons donc la typologie hydrologique suivante pour les bassins versants expérimentaux avec les valeurs des paramètres hydrologiques associés à chaque type de bassin.

Type El Viejo : bassins versants sur matériaux éruptifs acides (rhyolite, dacite, toba) aux fortes pentes, $\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}$, IL0 = 23 mm/h, F0/E = 10 mm, $E_m = 0,056 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_d = E_{24h} = 0,073 \text{ mm}^{-1/2}$.

Type El Tullido : bassins versants sur matériaux éruptifs acides et matériaux détritiques associant colluvions et alluvions, aux pentes moyennes à faibles, $\beta = 0,01 \text{ mm}^{-1}$, IL0 = 20 mm/h, F0/E = 10 mm, $E_m = 0,056 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_d = E_{24h} = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$.

Type El Muerto : petits bassins versants, de superficie inférieure à 0,5 km², sur matériaux calcaires et sur matériaux détritiques associant colluvions et alluvions, aux pentes fortes, $\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}$, IL0 = 29 mm/h, F0/E = 2,5 mm, $E_m = 0,083 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_d = 0,11 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_{24h} = 0,18 \text{ mm}^{-1/2}$.

Type Carboneras : bassins versants de superficie supérieure à 0,5 km², sur matériaux calcaires et détritiques associant colluvions et alluvions, aux pentes fortes, $\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}$, IL0 = 29 mm/h, F0/E = 10 mm, $E_m = 0,064 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_d = E_{24h} = 0,10 \text{ mm}^{-1/2}$.

Type Pastelero : bassins versants sur matériaux détritiques associant colluvions et alluvions, secondairement sur d'autres types de matériaux, avec un relief de commandement calcaire, aux pentes moyennes à faibles, $\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}$, IL0 = 20 mm/h, F0/E = 10 mm, $E_m = 0,067 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_d = 0,17 \text{ mm}^{-1/2}$, $E_{24h} = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$.

Type Oso Negro et Molino : petits bassins versants de superficie inférieure à 0,5 km², sur conglomérats basaltiques ou sur basaltes, aux pentes moyennes, $\beta = 0,10 \text{ mm}^{-1}$, $IL0 = 60 \text{ mm/h}$, $F0/E = 8,0 \text{ mm}$, $Em = 0,056 \text{ mm}^{-1/2}$, $Ed = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$, $E24h = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$.

10.2.2. Les *presones* du ranch Atotonilco et leurs bassins versants

Après avoir établi une typologie des bassins versants expérimentaux associant leurs caractères physiques et leurs paramètres hydrologiques du modèle global quadratique, il nous faut maintenant examiner comment appliquer cette typologie aux bassins versants non instrumentés du ranch Atotonilco situés en amont de petits barrages. Pour ce faire, nous avons réalisé l'inventaire des petits barrages construits à l'intérieur du ranch et caractérisé leurs bassins versants selon les critères retenus pour la typologie des bassins expérimentaux, à savoir les critères topographiques et géologiques. Nous y ajouterons le critère de couverture végétale, bien qu'il n'apparaisse pas déterminant pour l'estimation des paramètres hydrologiques à l'échelle des bassins versants étudiés, car il recoupe en partie la géologie.

Pour une gestion rationnelle de ses pâturages, le ranch est subdivisé en 10 quartiers (*fracciones*) eux mêmes fractionnés en enclos (*potreros*), chaque quartier comprenant de 6 à 14 enclos. Nous avons dessiné sur la figure 10.2 la position des petits barrages et leurs bassins versants et reporté à l'annexe X.2.1 la liste des *presones* avec leurs capacités de stockage à la cote de déversement, leurs coordonnées et l'altitude de leur point le plus bas c'est à dire au pied des digues. Chaque *presón* est numéroté sur la figure 10.2 dans l'ordre de sa présentation sur le tableau de l'annexe X.2.1.

A l'échelle du ranch, l'existence de cartes topographiques et géologiques à l'échelle 1/50 000 ème permet d'obtenir une bonne définition du relief, de la superficie et des taux de recouvrement des bassins versants par les différentes formations géologiques. En outre, la plupart des petits barrages sont indiqués sur la dernière carte topographique établie en 1970.

En ce qui concerne la texture des sols, nous ne disposons pas de relevés extensifs à l'échelle du ranch. C'est un critère qui pourrait être intéressant pour la détermination des paramètres β et $IL0$ dans le cadre d'une modélisation hydrologique spatialisée à l'échelle des bassins versants mais qui paraît difficile à utiliser dans une modélisation hydrologique globale. Il a donc été écarté de notre typologie.

Quant au couvert végétal, nous disposons d'une carte (chapitre 4, figure 4.11) présentant trois types de couverts végétaux : le couvert herbacé (pâturage), le couvert herbacé associé au couvert arbustif lâche (pâturages et arbustes) et le couvert herbacé associé au couvert arbustif dense (pâturage - matorral). En croisant la carte topographique et celle du couvert végétal, il est donc possible de caractériser chaque bassin versant selon son taux de recouvrement pour chaque type de couvert.

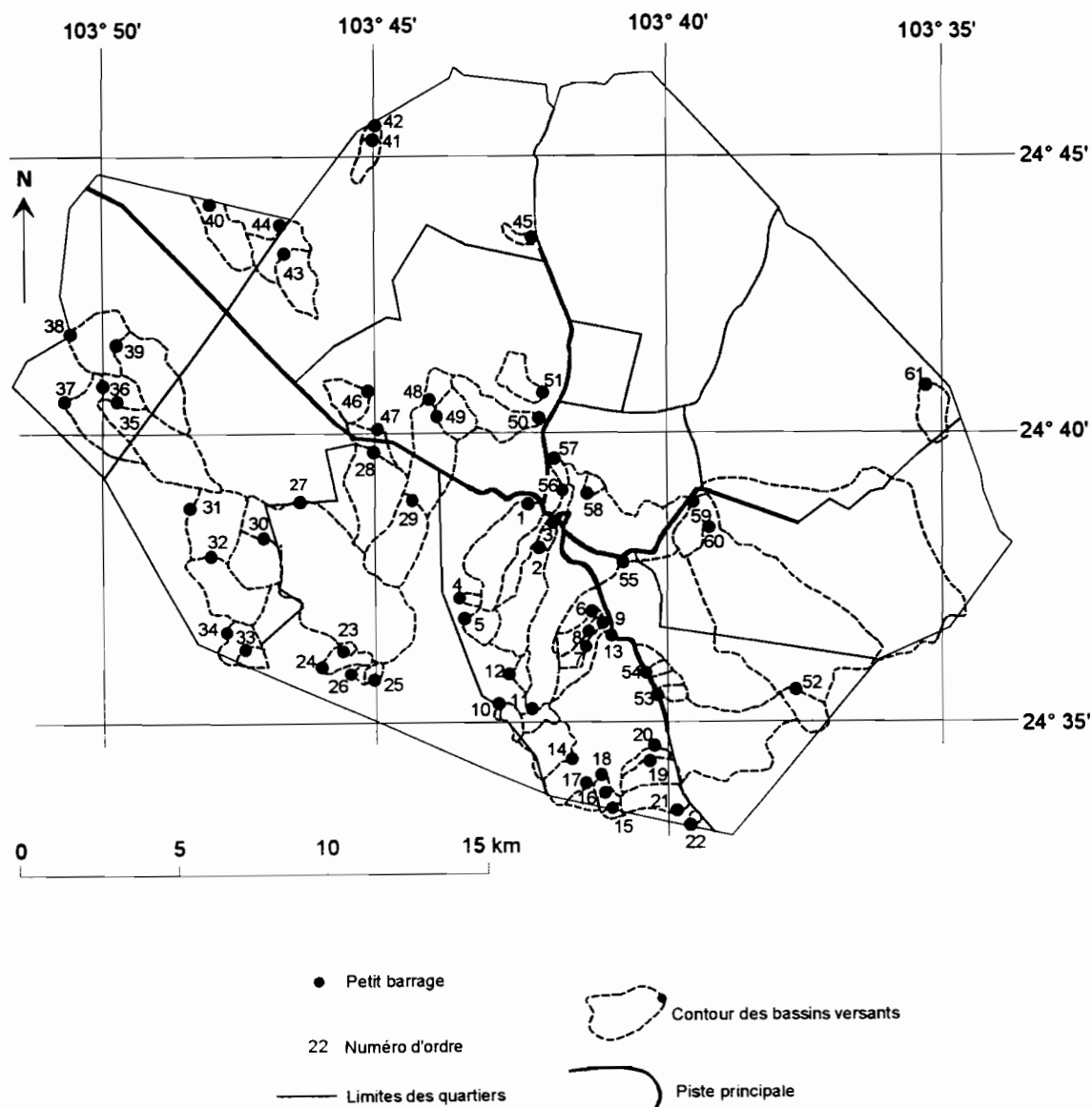


Figure 10.2. Les petits barrages (*presones*) du ranch Atotonilco et leurs bassins versants.

Nous avons reporté dans l'annexe X.2.2 les caractéristiques topographiques des bassins :

- la superficie du bassin versant (S) en km²,
- les altitudes maximales (Max.) et médianes (Méd.) du bassin versant,
- les altitudes médianes du bassin amont (Haut) et du bassin aval (Bas) lorsque le bassin doit être subdivisé en deux sous-bassins à cause de son hétérogénéité.

Nous avons reporté dans l'annexe X.2.3 :

- les pourcentages de recouvrement des types de couvert végétal, pâturages (Pât.), pâturages et arbustes (Pât. et arb.), pâturage et matorral (Mat.) ;
- les pourcentages de recouvrement des principales formations géologiques, roches éruptives acides (Rhy.), calcaires (Cal.), colluvions et alluvions (Al.), conglomérats basaltiques (Cong.) et basaltes (Basa.).

Dans les annexes X.2.1, X.2.2 et X.2.3, les bassins versants expérimentaux correspondent aux lignes en caractères gras à fond gris.

Le ranch Atotonilco comprend 61 petits barrages dont 5 ont été endommagés et ne fonctionnent plus. Après réfection des digues, ils sont cependant susceptibles de retrouver leur fonction. Nous les avons donc conservés dans l'inventaire. Plusieurs bassins versants sont emboîtés et deux à trois petits barrages peuvent se succéder sur le même cours d'eau. Dans ce cas, nous avons seulement considéré les bassins versants complémentaires situés entre l'ouvrage amont et l'ouvrage aval. Leurs superficies sont alors indiquées entre parenthèses dans l'annexe X.2.2. La superficie complète du bassin versant situé le plus en aval s'obtient en faisant la somme des superficies de tous les bassins situés en amont de l'ouvrage.

Pour établir la typologie générale de ces bassins, nous avons dressé le tableau 10.5 à double entrée, l'une des entrées étant réservée aux classes de superficie, l'autre aux classes de pente dominantes (couvrant plus de 20 % de la superficie du bassin), puis aux formations géologiques dominantes et enfin aux couverts végétaux dominants. L'examen du tableau 10.5 montre que parmi les 61 petits barrages du ranch, 55 sont alimentés par de petits bassins versants, de taille inférieure à 5 km², et 6 par des bassins versants de taille supérieure à 10 km². Dans le premier groupe, seule la classe 0,5 à 1 km² est de moitié moins fournie que les trois autres. Les aménagements sont réalisés à 65 % sur matériaux éruptifs acides, associés ou non à des matériaux détritiques (alluvions et de colluvions). Environ 25 % des ouvrages concernent des bassins versants comportant une partie notable de conglomérats basaltiques (plus de 20 % de leur superficie), associés ou non à des matériaux détritiques. Seulement 7 % des bassins sont situés sur les basaltes.

Cette répartition des bassins aménagés conforte nos propres observations sur leur aptitude à l'écoulement. Les bassins versants expérimentaux situés sur conglomérats basaltiques (Oso Negro) et sur basaltes (Molino) sont, en effet, les seuls à n'avoir pratiquement pas ruisselé de 1996 à 1998. Peu de bassins versants aménagés (5 %) ont une partie notable de leur surface située sur matériaux calcaires mais environ 16 % possèdent un ou plusieurs reliefs de commandement calcaire. Or ces

reliefs fournissent à leurs versants du calcaire de dissolution qui se répartit ensuite sous la forme d'un encroûtement ou de carbonate de calcium intégré à la composition des sols de bas de versant et nous avons vu au chapitre 9 quel rôle important joue ce corps chimique sur l'aptitude des parcelles expérimentales au ruissellement.

Tableau 10.5. Dénombrement des bassins versants équipés de *presones* par classe de superficie, par type de formation géologique, classe de pente et type de formation végétale.

Classes de superficies		0,1 à 0,5 km ²	0,5 à 1 km ²	1 à 2 km ²	2 à 5 km ²	5 à 10 km ²	plus de 10 km ²
Nombre	(61)	17	8	16	14	0	6
Roches éruptives Acides	(40)	11	6	10	9	0	4
Calcaire	(03)	1	1	1	1	0	0
Alluvions et colluvions	(34)	5	3	10	11	0	6
Conglomérats	(15)	5	1	3	7	0	0
Basaltes	(04)	1	0	1	0	0	2
Pentes inférieures à 5 %	(19)	2	2	5	10	0	-
Pentes de 5 à 10 %	(28)	7	5	9	7	0	-
Pentes de 10 à 20 %	(18)	7	2	7	2	0	-
Pentes supérieures à 20 %	(20)	9	4	4	3	0	-
Pâturages	(24)	4	4	4	7	0	5
Pâturages et arbustes	(49)	15	7	13	10	0	4
Pâturages et matorral	(02)	0	0	0	0	0	(2)

La répartition des bassins versants en fonction des pentes de leurs versants est assez équilibrée, sauf en ce qui concerne la classe des pentes comprises entre 5 et 10 %, laquelle prédomine nettement sur les trois autres. La prédominance de l'association végétale du pâturage herbacé et des arbustes apparaît également de manière très claire, de même que la faible importance du matorral au sens strict.

Le croisement des classifications géologique et topographique (tableau 10.6) fournit des renseignements complémentaires intéressants sur la répartition des formations géologiques selon la pente des versants.

Tableau 10.6. Dénombrement des bassins versants équipés de *presones* par croisement des classifications géologiques et topographiques.

Formations géologiques	Pente inférieure à 5%	Pente de 5 à 10 %	Pente de 10 à 20 %	Pente supérieure à 20 %
Roches éruptives acides	3	15	9	22
Calcaires	0	0	3	2
Colluvions et alluvions	15	13	5	0
Conglomérats basaltiques	8	5	5	1
Basaltes	0	1	3	0

Ce tableau montre que les bassins sur roches éruptives acides se situent à peu près dans toutes les classes de pentes mais sont très peu nombreux dans la classe des pentes inférieures à 5 %. Par contre les bassins versants calcaires sont exclusivement localisés sur pentes fortes, supérieures à 10 % et les matériaux détritiques principalement sur des pentes moyennes à faibles. Les bassins versants sur conglomérats se répartissent essentiellement dans les classes de pente inférieure à 10 % et les bassins sur basalte dans la classe des pentes comprises entre 10 et 20 %.

On peut finalement établir une typologie des bassins versants aménagés en considérant l'ordre hiérarchique suivant :

- 5 classes décrivant les formations géologiques,
- 3 classes de superficie avec comme limites 1 km², 5 km² et 10 km²,
- 2 classes de pente des versants avec comme limite 10 %,
- 3 classes de couvert végétal.

En croisant cette typologie avec celle des bassins versants expérimentaux, nous allons voir maintenant comment fixer les règles de transposition des paramètres hydrologiques du modèle global quadratique.

10.2.3. Les règles de la transposition des paramètres hydrologiques

Dans le processus de transposition, la superficie des bassins versants joue un rôle important car l'application d'un modèle hydrologique global n'est possible que si la variabilité spatiale de la pluie et celle des caractéristiques physiographiques des bassins ne sont pas trop fortes. Pour la pluie, cette condition donne un sens à la pluie moyenne sur le bassin versant. Pour les caractéristiques physiographiques, une trop grande hétérogénéité conduit à subdiviser les bassins en sous-bassins plus homogènes. En ce qui concerne le ranch Atotonilco, les bassins versants dont la superficie est supérieure à 10 km² constituent une classe à part pour laquelle il n'est pas question de réaliser une simple transposition des modèles globaux quadratiques en raison d'une part de la variabilité spatiale pluviométrique extrêmement forte dans cette région (cf. chapitre 6) et d'autre part de la complexité naturelle qui se rattache à leur dimension. En outre, la classe des bassins dont la superficie est comprise entre 5 et 10 km² est vide. Nous écarterons donc ces deux classes de notre typologie globale. Pour effectuer une transposition à ces deux échelles, il reste toutefois la possibilité de subdiviser les bassins de superficie supérieure à 10 km² en sous-bassins de taille inférieure à 5 km².

Si on compare la description de la végétation établie au chapitre 4 et celle des bassins versants expérimentaux (chapitre 5 et chapitre 9, annexe IX.3), on ne peut que constater l'écart important entre la précision dans la définition des types de couverture végétale à l'échelle des bassins versants expérimentaux et son imprécision à l'échelle du ranch. Par ailleurs, nous avons vu au chapitre 9, sur l'échantillon des sept bassins expérimentaux, qu'il existe d'assez bonnes corrélations entre le couvert végétal xérophile à plantes grasses et les formations géologiques des basaltes et conglomérats basaltiques d'une part et une excellente corrélation entre le couvert arbustif ou arboré et la formation géologique des colluvions et alluvions d'autre part. Il est impossible de confirmer ces relations à l'échelle du ranch car le couvert végétal xérophile à plantes grasses n'a pas été pris en

considération à cette échelle et l'importance prise par l'association entre le pâturage et le couvert arbustif masque toute relation entre les formations géologiques et les formations végétales. Il semble donc inutile de conserver le critère du couvert végétal comme clé de notre transposition à l'échelle du ranch.

En traitant à part les bassins versants de taille supérieure à 10 km², il reste donc 5 classes géologiques, 2 classes de superficie et 2 classes de pente pour établir la typologie générale des bassins versants aménagés, soit un total théorique de 20 classes. Par ailleurs, en analysant les comportements des bassins versants sur basalte (Molino) et sur conglomérats basaltiques (Oso Negro) nous avons constaté une certaine similitude de comportement, qu'il faudrait confirmer par d'autres observations, mais qui nous conduit ici à associer les bassins situés sur ces deux formations géologiques en une seule classe. Le nombre total des classes se trouve donc ainsi réduit à 16. Le nombre de bassins versants étudiés étant de sept, toutes les classes de la typologie générale ne peuvent donc être caractérisées dans leur comportement hydrologique par un bassin versant expérimental. En utilisant toutes les informations disponibles et en raisonnant par analogie, des règles peuvent cependant être définies permettant d'estimer les paramètres hydrologiques des classes non pourvues en bassin versant représentatif. Nous allons maintenant examiner cas par cas ces règles de transposition.

A- Les bassins versants sur matériaux éruptifs acides (rhyolite, dacite, toba)

a-1 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes supérieures à 10 %

Aucun bassin versant expérimental ne correspond à cette classe mais le bassin El Viejo est celui qui s'en rapproche le plus. En considérant d'une part les relations qui existent entre les bassins El Muerto et Carboneras, aux tailles différentes mais sur les mêmes types de matériaux, et d'autre part les valeurs des paramètres hydrologiques à l'échelle des parcelles expérimentales sur rhyolite, on peut adopter pour les paramètres β et IL0 les mêmes valeurs que pour le bassin El Viejo, pour F0/E une valeur légèrement plus faible et pour E une valeur nettement plus forte (30 %) :

$$\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 23 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = 6,0 \text{ mm}, \text{ Em} = 0,075 \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$$

a-2 Bassins de taille comprise entre 0,1 km² et 1 km² aux pentes inférieures à 10 %

Aucun bassin versant expérimental ne correspond à cette classe et on manque d'informations sur les bassins versants aux pentes faibles. En comparant les comportements des bassins El Viejo et El Tullido on peut estimer probable une diminution du paramètre β , une légère diminution du paramètre IL0, une valeur identique à la classe précédente du paramètre F0/E et des valeurs de E analogues aux précédentes :

$$\beta = 0,01 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 20 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = 6,0 \text{ mm}, \text{ Em} = 0,075 \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$$

a-3 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km² aux pentes supérieures à 10 %

Le bassin versant expérimental correspondant est celui de **El Viejo** dont les valeurs des paramètres hydrologiques sont les suivantes :

$$\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 23 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = 10 \text{ mm}, \text{ Em} = 0,056 \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = 0,073 \text{ mm}^{-1/2}$$

a-4 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km² aux pentes inférieures à 10 %

Le bassin versant expérimental correspondant est celui de **El Tullido** dont les valeurs des paramètres hydrologiques sont les suivantes :

$$\beta = 0,01 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 20 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = 10 \text{ mm}, \text{ Em} = 0,056 \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$$

B- Les bassins versants sur matériaux éruptifs et détritiques basiques (basaltes et conglomérats basaltiques)**b-1 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes supérieures à 10 %**

Les bassins versants expérimentaux correspondant sont ceux de **Molino** sur basalte et **Oso Negro** sur conglomérat basaltique. Ces bassins n'ont pratiquement pas coulé de 1996 à 1998. Les valeurs de leurs paramètres hydrologiques sont les suivantes :

$$\beta = 0,10 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 60 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = (8) \text{ mm}, \text{ Em} = (0,056) \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = (0,12) \text{ mm}^{-1/2}$$

b-2 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes inférieures à 10 %

Aucun bassin versant expérimental ne correspond à ce cas mais on peut utiliser les valeurs de β et IL0 du cas précédent en diminuant les valeurs du paramètre E de 30 % pour tenir compte de l'augmentation de la durée du ruissellement sur les versants aux pentes plus faibles.

$$\beta = 0,10 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 60 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = (8) \text{ mm}, \text{ Em} = (0,042) \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = (0,12) \text{ mm}^{-1/2}$$

b-3 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km², aux pentes supérieures à 10 %

Aucun bassin expérimental ne correspond à ce cas. En raisonnant par analogie avec les cas des bassins El Muerto et Carboneras, on peut conserver les valeurs des paramètres β et IL0 du bassin El Molino, augmenter la valeur du paramètre F0/E et diminuer celle du paramètre E dans les mêmes proportions (25 %). Il vient donc :

$$\beta = 0,10 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 60 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = (10) \text{ mm}, \text{ Em} = (0,042) \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = \text{E24h} = (0,08) \text{ mm}^{-1/2}$$

b-4 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km², aux pentes inférieures à 10 %

Aucun bassin de ce type n'a été équipé d'un preson.

C- Les bassins versants avec reliefs de commandement calcaires

Plutôt que de considérer les seuls bassins versants à dominante calcaire qui sont très peu nombreux compte tenu de la faible couverture calcaire du ranch Atotonilco, nous avons préféré élargir cette classe aux bassins qui possèdent un relief de commandement calcaire susceptible de générer sur les versants un encroûtement calcaire ou un enrichissement en carbonate de calcium de leurs sols.

c-1 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes supérieures à 10 %

Le bassin type de cette classe est celui de **El Muerto** dont les paramètres hydrologiques sont les suivants, à l'exception du paramètre F0/E revu à la hausse pour tenir compte du comportement hydrologique des parcelles expérimentales :

$$\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}, \text{ IL0} = 29 \text{ mm/h}, \text{ F0/E} = 5 \text{ mm}, \text{ Em} = 0,083 \text{ mm}^{-1/2}, \text{ Ed} = 0,11 \text{ mm}^{-1/2}, \text{ E24h} = 0,12 \text{ mm}^{-1/2}$$

c-2 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes inférieures à 10 %

Il n'existe pas de bassin expérimental correspondant à cette classe mais en procédant par analogie avec les correspondances entre les bassins Carboneras et Pastelero on peut en déduire, par rapport à la classe précédente, une valeur identique du paramètre β , une baisse de 40 % des paramètres IL0 et F0/E et une hausse légère de E (5 %) soit :

$$\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}, \text{IL0} = 20 \text{ mm/h}, \text{F0/E} = 3 \text{ mm}, \text{Em} = 0,087 \text{ mm}^{-1/2}, \text{Ed} = 0,17 \text{ mm}^{-1/2}, \text{E24h} = 0,15 \text{ mm}^{-1/2}$$

c-3 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km², aux pentes supérieures à 10 %

Le bassin type de cette classe est celui de **Carboneras** dont les paramètres prennent les valeurs suivantes :

$$\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}, \text{IL0} = 29 \text{ mm/h}, \text{F0/E} = 10 \text{ mm}, \text{Em} = 0,064 \text{ mm}^{-1/2}, \text{Ed} = \text{E24h} = 0,10 \text{ mm}^{-1/2}$$

c-4 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km², aux pentes inférieures à 10 %

Le bassin type est ici celui de **Pastelero** dont les paramètres sont :

$$\beta = 0,02 \text{ mm}^{-1}, \text{IL0} = 20 \text{ mm/h}, \text{F0/E} = 10 \text{ mm}, \text{Em} = 0,067 \text{ mm}^{-1/2}, \text{Ed} = 0,17 \text{ mm}^{-1/2}, \text{E24h} = 0,10 \text{ mm}^{-1/2}$$

D- Les bassins versants sur matériaux détritiques constitués de colluvions et d'alluvions

Ces bassins versants constituent des cas un peu à part car les colluvions et les alluvions résultent de la désagrégation et de la décomposition de matériaux situés plus haut sur les versants. Les matériaux détritiques sont donc le plus souvent associés sur un même bassin à d'autres formations géologiques et il faut distinguer les matériaux détritiques en fonction de leur origine géologique. Le plus souvent, seuls les bassins versants complémentaires situés en aval d'autres bassins peuvent être couverts majoritairement par ce type de matériaux.

d-1 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes supérieures à 10 %

d-3 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km², aux pentes supérieures à 10 %

Aucun petit barrage n'est installé sur des bassins couverts majoritairement de colluvions et d'alluvions sur des pentes supérieures à 10%.

d-2 Bassins de taille comprise entre 0,1 et 1 km², aux pentes inférieures à 10 %

d-4 Bassins de taille comprise entre 1 et 5 km², aux pentes inférieures à 10 %

Pour ces deux classes, on prendra les paramètres des bassins versants des catégories (A, B ou C) et classes correspondantes (2 ou 4), en fonction de la formation géologique dont sont issus les matériaux détritiques, et de la superficie du bassin.

10.3. Extrapolation

La validation du modèle global quadratique pour les années 1997 et 1998, sur les 7 bassins versants expérimentaux, nous a permis d'étendre le champ d'application de ce modèle hors de sa période de calage, l'année 1996. Les principales conclusions de cette phase de validation sont :

- la confirmation d'une bonne adéquation du modèle global quadratique,
- la nécessité de faire varier la constante quadratique F avec l'indice des pluies antérieures IK ,
- l'existence d'un coefficient de croissance quadratique (E) en relation avec l'occurrence des pluies aux échelles saisonnière et journalière, un coefficient moyen (E_m) pouvant être utilisé pour la plupart des averses.

La définition des règles de transposition du modèle global quadratique (sous-chapitre 10.2) permet l'utilisation de ce modèle à l'intérieur du ranch Atotonilco sur la plupart des bassins versants équipés de petits barrages, à condition de pouvoir définir, pour chacun d'entre eux, la pluie utile (PUIL) événement par événement. Pour les bassins de taille supérieure à 10 km² ou pour les bassins de forme allongée, qui doivent être subdivisés en sous-bassins, il est nécessaire de définir deux ou plusieurs pluies utiles pour un même événement. Or cette variable est normalement définie à partir du hyétogramme des averses et du seuil d'intensité de pluie limite du ruissellement (Cf. chapitre 8) alors que nous ne disposons d'enregistrements pluviographiques que sur la période 1996-1998, pour seulement 9 postes installés sur l'ensemble du ranch dont 7 sur les bassins expérimentaux. Malgré ce handicap, pour calculer la pluie utile à partir de la pluie moyenne journalière, nous nous proposons d'analyser les relations de la pluie utile avec l'intensité pluviométrique maximale sur le pas de temps de 30 minutes d'une part et les relations entre cette intensité maximale et la pluie journalière à l'échelle des bassins versants d'autre part.

Pour procéder à une extrapolation hydrologique des écoulements hors de la période de forte densité d'observations (1996-1998), nous utiliserons la longue série des pluies journalières de la station Atotonilco située au cœur du ranch, à 1985 mètres d'altitude. Pour reconstituer les pluies journalières à l'échelle des bassins et sous-bassins, nous utiliserons d'une part les relations établies au chapitre 6 entre l'altitude et les pluies annuelles et, d'autre part, les relations qui restent à établir entre l'altitude et les nombres de jours de pluie, entre la pluie moyenne journalière et la pluie ponctuelle. Pour les bassins versants de taille supérieure à 10 km² il nous faudrait analyser la répartition spatiale des averses, car nous avons vu au chapitre 6 que les averses pouvaient être de taille variable, les plus petites cellules pluvieuses ne dépassant pas 5 km de diamètre, les cellules un peu plus étendues ayant un diamètre de 14 km. Pour cette raison nous écarterons de notre extrapolation ce type de bassin versant.

10.3.1. Relations entre la pluie utile et l'intensité pluviométrique maximale en 30 minutes

Nous donnons dans le tableau 10.1 pour le bassin El Viejo et dans les annexes X.1.1 à X.1.4 pour les autres bassins versants expérimentaux, les valeurs des pluies utiles ayant engendré du ruissellement et les valeurs correspondantes des intensités pluviométriques maximales au pas de

temps de 30 minutes. Le nombre d'événements étant limité à 20 par bassin versant, nous avons reporté sur la figure 10.3 l'ensemble des événements pour tous les bassins versants.

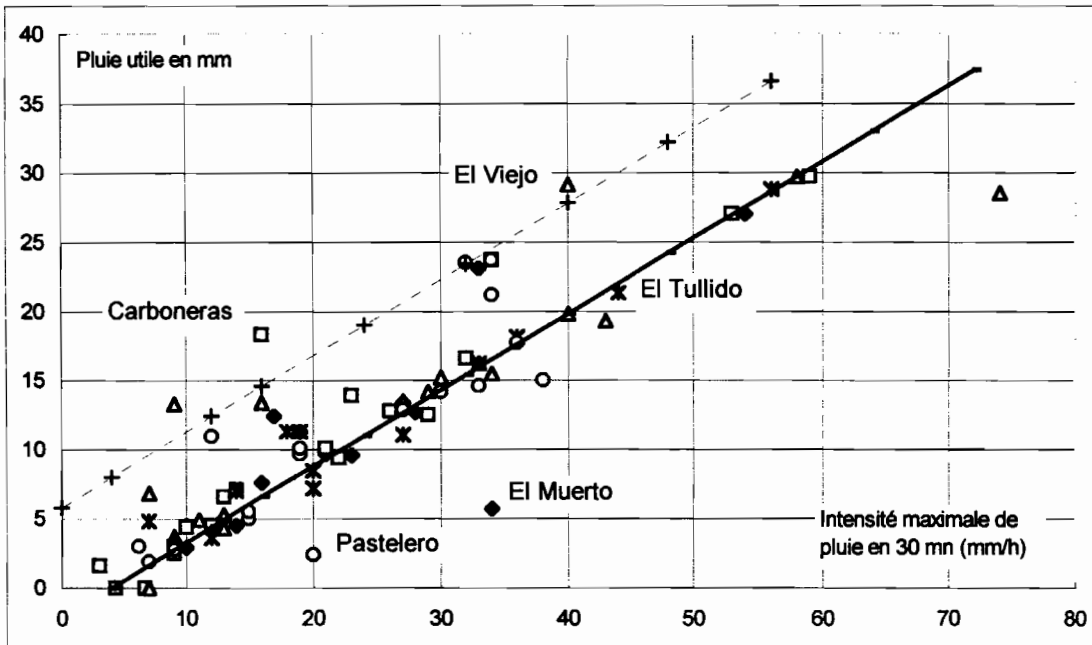


Figure 10.3. Relations entre la pluie utile et l'intensité maximale de pluie en 30 mn.

La figure 10.3 montre qu'il existe une relation étroite entre la pluie utile (PUIL) et l'intensité maximale de pluie en 30 mn. Pour la majorité des événements, environ 75 % d'entre eux, on peut utiliser la relation $PUIL = 0,55 (IP30 - 4)$ matérialisée sur la figure ci-dessus par un trait plein. Les 25 autres pour-cent correspondent à des événements que l'on peut répartir en trois groupes :

- un groupe (10 %) pour lequel $PUIL = 0,55 (IP30 - 4) + 4$
- un second groupe (10 %) avec $PUIL = 0,55 (IP30 - 4) + 8$
- un troisième groupe (5 %) où $PUIL = 0,55 (IP30 - 4) - 8$

Une grande majorité (75 %) des événements pluvieux ayant engendré un ruissellement sur les bassins versants expérimentaux ont donc une durée de pluie utile de l'ordre de 30 minutes puisqu'elle est égale à la moitié de l'intensité de pluie exprimée en mm/h sur ce même pas de temps. Pour 20 % des événements pluvieux qui ruissellent, la durée de la pluie utile est supérieure à 30 minutes. En d'autres termes, pour ces événements les intensités de pluie postérieures ou antérieures au maximum de l'averse sont supérieures au seuil d'intensité correspondant à l'intensité de pluie limite du ruissellement. Enfin 5 % des événements pluvieux qui ruissellent ont une durée de pluie utile inférieure à 30 minutes. Pour ceux-ci, une partie de la pluie tombée en 30 minutes ne ruisselle pas.

10.3.2. Relations entre l'intensité pluviométrique maximale en 30 minutes et la pluie moyenne journalière à l'échelle des bassins versants

Nous avons reporté sur les tableaux des annexes X.3.1 à X.3.3 les pluies journalières et les intensités pluviométriques maximales en 30 minutes événement par événement pour les années 1996 et 1997 sur les bassins versants El Viejo (annexe X.3.1), El Muerto et Carboneras (annexe X.3.2), El Tullido et Pastelero (annexe X.3.3). Les figures correspondantes sont la figure 10.4 pour le bassin El Viejo et les 2 figures placées à l'annexe X.3.4 pour les autres bassins.

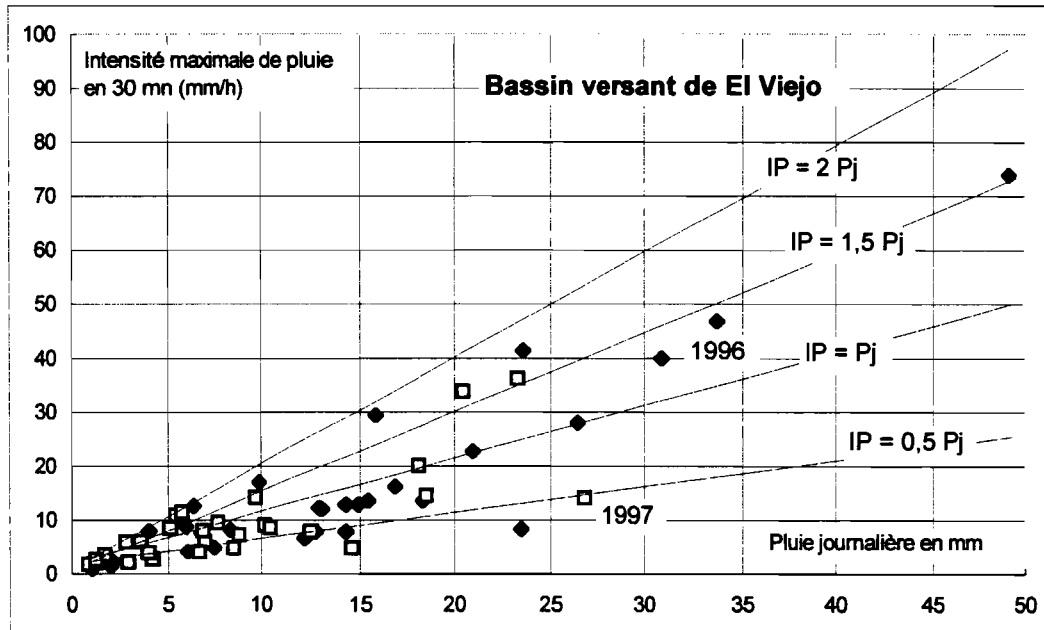


Figure 10.4. Relations entre l'intensité maximale de pluie en 30 mn et la pluie moyenne sur le bassin versant El Viejo.

L'examen de la figure 10.4 et des deux figures de l'annexe X.3.4 montre que les relations entre l'intensité maximale pluviométrique en 30 minutes (IP_{30}) et la pluie journalière moyenne (P_j) sur les bassins versants sont complexes mais varient entre deux extrêmes :

- $IP_{30} = 0,5 P_j$ pour les plus faibles intensités maximales,
- $IP_{30} = 2 P_j$ pour les plus fortes intensités.

Au dessous de 10 mm de pluie moyenne journalière, la densité des points est forte pour tous les bassins versants et ceux-ci se répartissent à peu près de la même façon entre les deux droites extrêmes. Pour déterminer l'intensité maximale de pluie en 30 mn à partir d'une pluie moyenne journalière on pourra donc, pour les pluies journalières inférieures à 10 mm, tirer au hasard, sur l'intervalle 0,5 à 2, les valeurs du coefficient permettant de calculer cette intensité maximale.

Entre 10 et 20 mm de pluie moyenne journalière, la répartition des points n'est plus homogène. Elle est la suivante sur le bassin versant El Viejo :

- 50 % des points se situent entre les droites 0,5 Pj et 1,0 Pj,
- 25 % des points se situent entre les droites 1,0 Pj et 1,5 Pj,
- 25 % des points se situent entre les droites 1,5 Pj et 2 Pj.

Les fortes pluies journalières, supérieures à 20 mm, ont tendance à se répartir différemment au profit des intensités plus fortes. Pour le bassin versant El Viejo, elles se répartissent ainsi :

- 25 % des points se situent entre les droites 0,5 Pj et 1,0 Pj,
- 50 % des points se situent entre les droites 1,0 Pj et 1,5 Pj,
- 25 % des points se situent entre les droites 1,5 Pj et 2 Pj.

Pour reconstituer les intensités maximales de pluie en 30 mn à partir des pluies journalières à l'échelle des bassins versants, il faudra tenir compte de cette répartition des coefficients de passage entre ces deux variables pluviométriques. On devra également tenir compte des caractères propres aux pluies de fin de saison, lesquelles sont parfois de longue durée avec des intensités particulièrement faibles (pluies du 3 et 4 octobre 1996).

10.3.3. La série des pluies journalières de la station Atotonilco

L'examen du tableau 10.7 montre qu'avant 1990, seule la période allant de 1971 à 1982 est utilisable car les observations y sont presque ininterrompues. Sur cette période, manquent les mois de septembre et octobre 1973, ainsi que décembre 1976. Compte tenu des pluies exceptionnelles du mois d'août 1973, cette année est intéressante à conserver dans l'échantillon et nous prendrons pour les mois de septembre et octobre 1973 les valeurs journalières des mois de septembre 1988 et octobre 1981 dont les totaux mensuels correspondent à des valeurs médianes de ces deux mois. Quant au mois de décembre 1976, les pluies journalières de ce mois n'engendrent généralement pas d'écoulement en raison de la faiblesse de leurs intensités.

Pour la période allant de 1994 à 1998, nous disposons d'observations pluviométriques journalières sur un assez grand nombre de postes pluviométriques : 25 en 1994, 32 en 1995, 45 en 1996, 52 en 1997 et 30 en 1998. Pendant ces 5 années, tous les postes n'ont pas fait l'objet d'observations journalières régulières et plusieurs correspondent à des totalisateurs dont les relevés sont effectués toutes les semaines ou tous les mois. Sur cette période de cinq ans, il est cependant possible d'utiliser les valeurs observées à proximité des bassins versants équipés de petits barrages alors que sur la période antérieure nous disposons uniquement de relevés journaliers à la station Atotonilco.

Tableau 10.7. Pluies mensuelles observées à la station Atotonilco.

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1969	-	-	-	0	68,5	15,5	83	-	-	-	-	-
1970	-	-	-	-	-	-	-	-	126,9	68	0	0
1971	3	0	0	5	0	34,3	24	171,5	24,5	55,5	0	18
1972	0	0	3	0	79,5	112	52,7	50	31	14	12	0
1973	0	7	0	0	22	61,6	70,2	295,5	(87,9)	(116)	0	11
1974	0,8	0	0	1	10,5	3	71,5	102,5	91,5	3	0	9
1975	0	0	0	0	2,7	18	87,2	81,5	7,5	10	0	36
1976	0	0	0	17	13	75,5	218,9	40,6	138	42,5	21	-
1977	0	0	0	0	0	114	157,3	47,1	36	24	0	0
1978	0	0	0	0	5,1	35,6	104,2	108,5	87,9	49	0	4,9
1979	1,6	4	0	0	5,5	27,8	66,8	119,2	72,2	0	0	4,5
1980	5	19,2	0	3	1	0	74,3	110,4	101,4	35,8	15	3
1981	29,1	0	0	5	0	97	24,6	66,1	105	11,6	0	32
1982	0	0,5	0	20,1	5	10	28	50,4	11,2	0	28	(12)
1983	-	-	-	-	(120)	12,5	18,1	156,5	86,6	-	13	0
1996	0	3	0	0	11	42	57,5	134	148	85,5	11	0
1997	30	18	14	37	25	53	75	29	76	51	0	24,5
1998	2	3	0	0	0	15	49	107	47	56	9	0

Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs douteuses ou estimées.

Les tirets signifient une absence d'observation.

10.3. 4. Relations entre l'altitude et la pluviométrie

Nous avons montré au chapitre 6 que la pluie annuelle croît avec l'altitude selon un gradient moyen de 42,3 mm pour 100 mètres en année sèche (1994 et 1995), de 19,5 mm pour 100 mètres en année humide (1996 et 1997). La valeur annuelle du gradient pluviométrique altitudinal peut donc être estimé à 30 mm pour 100 mètres.

Nous avons placé dans le tableau 10.8 les nombres totaux de jours de pluie et les nombres de jours de pluie supérieurs à 5 mm des années 1996 et 1997 pour 9 postes entre les altitudes 1740 m (Las Jaulas) et 2150 m (El Viejo). Les figures 10.5 et 10.6 correspondent respectivement aux variations du nombre total de jours de pluie avec l'altitude et du nombre de jours de pluie supérieurs à 5 mm.

Tableau 10.8. Nombre de jours de pluie dans le ranch Atotonilco.

Postes	Haciendita	Las Jaulas	San Jose	Oso Negro	Atotonilco	Mezquite	El Muerto	Carboneras	El Viejo
Altitude en m	1694	1740	1875	1880	1980	1990	2080	2085	2150
Nombre total de jours de pluie									
1996	30	31	54	52	35	43	50	46	47
1997	20	20	35	28	34	34	43	37	42
Nombre de jours de pluie supérieure à 5 mm									
1996	23	26	19	19	28	22	23	26	27
1997	17	13	15	17	17	14	14	16	20

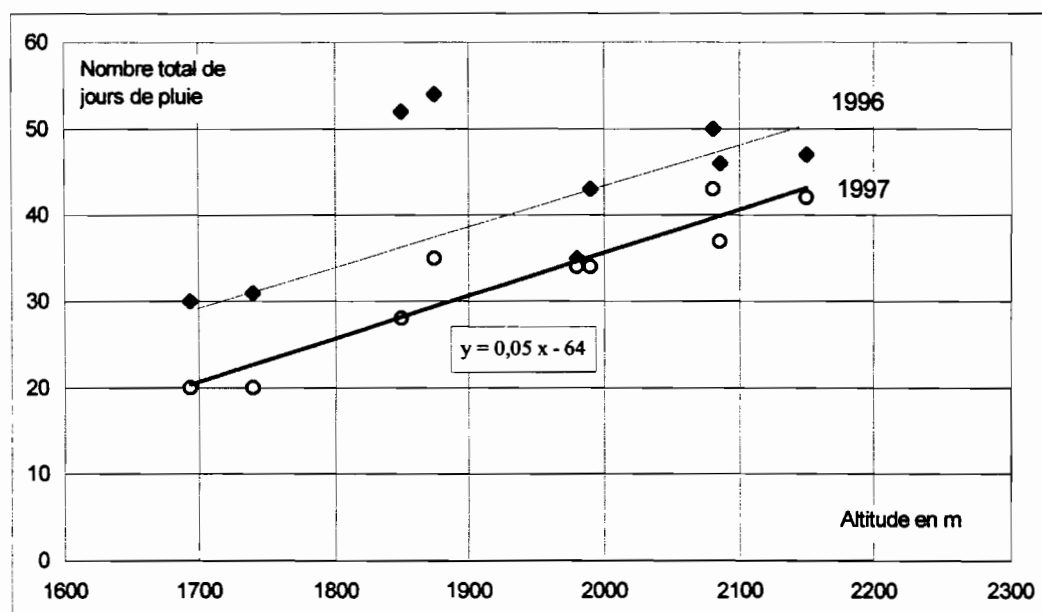


Figure 10.5. Nombre de jours de pluie en fonction de l'altitude dans le ranch Atotonilco.

Sur la figure 10.5 on peut voir que le gradient altitudinal du nombre total de jours de pluie est voisin de 5 jours par an pour 100 mètres et sur la figure 10.6 que le gradient altitudinal du nombre de jours de pluie supérieure à 5 mm est proche de 1 jour par an pour 100 mètres. Connaissant la pluie journalière à la station Atotonilco dont l'altitude est 1980 m, il est donc possible de reconstituer les valeurs journalières des années 1971 à 1982 à d'autres altitudes à l'intérieur du ranch en utilisant d'une part le gradient altitudinal moyen annuel, égal à 30 mm pour 100 m, et d'autre part en répartissant ce supplément pluviométrique par l'accroissement du nombre de jours de pluie et par l'accroissement de quelques valeurs journalières.

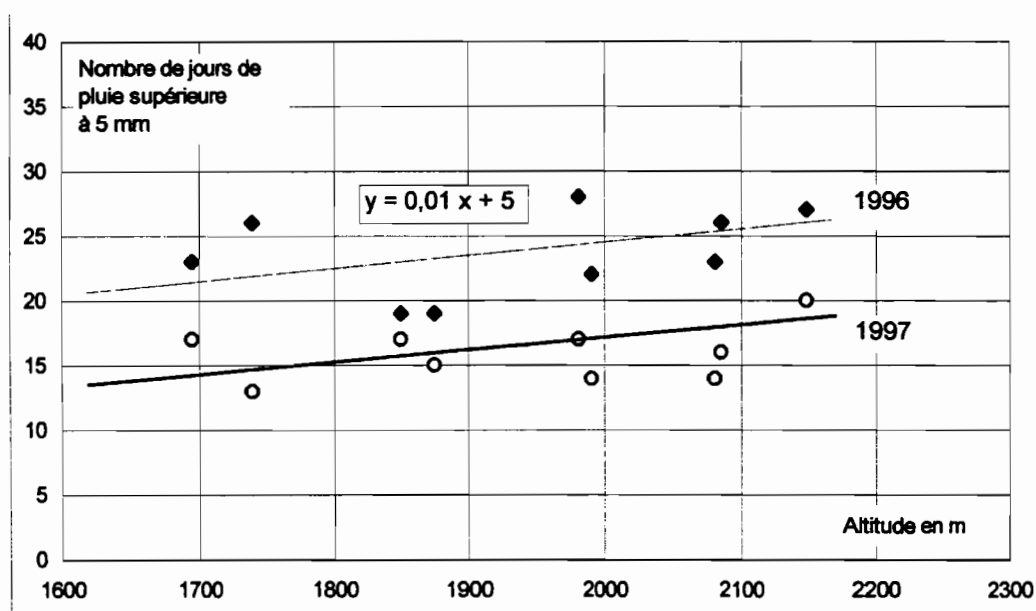


Figure 10.6. Relations entre le nombre de jours de pluie supérieure à 5 mm et l'altitude.

10.3.5. Extrapolation des écoulements pour la période 1971-1983

L'utilisation du modèle global quadratique événement par événement sur la période 1971-1983 nous permet de générer 13 années d'apports sur trois bassins versants expérimentaux : ceux de El Muerto, Carboneras et Pastelero, à partir des pluies journalières observées à la station Atotonilco. Cependant, pour ce faire, il nous faut tenir compte à la fois du gradient pluviométrique altitudinal et, pour déterminer la pluie utile (PUIL), des relations entre cette variable et l'intensité maximale pluviométrique en 30 minutes d'une part, entre cette intensité et la pluie journalière d'autre part.

Pour tenir compte des variations pluviométriques en fonction de l'altitude, nous utiliserons les résultats obtenus au paragraphe précédent et corrigerons annuellement les pluies journalières observées à la station Atotonilco en ajoutant 30 mm de pluie pour 100 mètres de dénivellée supplémentaire et en répartissant cette pluie sur la période estivale à raison de 1 jour de pluie supérieure à 5 mm et 4 jours de pluie inférieure à 5 mm pour 100 m de dénivellée supplémentaire. Les corrections à apporter aux séries pluviométriques sont consignées sur le tableau 10.9 pour chaque bassin versant. L'excédent pluviométrique a été réparti dans les périodes pluvieuses en utilisant une table de nombres au hasard pour déterminer les jours et les quantités de pluie journalière.

Tableau 10.9. Différences d'altitude entre la station Atotonilco et les bassins versants expérimentaux, extrapolation des séries de pluies journalières.

Bassin versant	Dénivelée (Atotonilco)	Pluie annuelle complémentaire	Jours de pluie supplémentaires	
			sur le total annuel	avec $P_j > 5$ mm
El Muerto	+ 155 m	+ 47 mm	8	2
Carboneras	+ 135 m	+ 40 mm	7	1
Pastelero haut	+ 100 m	+ 30 mm	5	1
Pastelero bas	+ 40 m	+ 12 mm	2	0

Par ailleurs, l'analyse des relations entre la pluie journalière (P_j) et l'intensité maximale de pluie en 30 mn ($I_{\max}$) a montré (paragraphe 10.3.2) que cette intensité maximale pouvait être déterminée en choisissant un rapport des deux variables ($I_{\max} / P_j$) compris entre 0,5 et 2, sachant que ces rapports se répartissent inégalement par tranche de pluie journalière ($P_j < 10$ mm, $10 < P_j < 20$, $P_j > 20$ mm) et par classe de valeur (paragraphe 10.3.2). Nous avons placé au tableau 10.10 la répartition du nombre des valeurs du rapport $I_{\max} / P_j$ pour les bassins versants de El Muerto et Carboneras d'une part, Pastelero et El Tullido d'autre part, en pourcentages pour chaque tranche pluviométrique et chacune des trois classes de valeurs de ce rapport : 0,5 à 1,0 ; 1,0 à 1,5 et 1,5 à 2,0.

Tableau 10.10. Répartition en pourcentages des valeurs du rapport entre l'intensité maximale pluviométrique en 30 mn ($I_{\max}$) et la pluie journalière (P_j) sur les bassins versants.

Pluie journalière	Pj < 10 mm			10 mm < Pj < 20 mm			Pj > 20 mm		
imax / Pj	0,5 – 0,99	1,0 – 1,49	1,5 – 2,0	0,5 – 0,99	1,0 – 1,49	1,5 – 2,0	0,5 – 0,99	1,0 – 1,49	1,5 – 2,0
El Muerto Carboneras	33	33	33	50	25	25	25	50	25
Pastelero El Tullido	33	33	33	25	50	25	50	30	20

Pour déterminer l'intensité maximale pluviométrique en 30 mn nous avons utilisé le tableau 10.10 comme tableau de contingence en tirant au hasard les valeurs du rapport $I_{\max} / P_j$ uniquement pour les averses susceptibles de ruisseler, c'est à dire celles pour lesquelles la valeur maximale possible de $I_{\max}$ ($2 P_j$) était supérieure à l'intensité de pluie limite du ruissellement (I_L) au jour considéré.

Enfin, pour déterminer la pluie utile (PUIL) nous avons utilisé la relation moyenne entre cette variable et l'intensité maximale pluviométrique en 30 mn définie au paragraphe 10.3.1 Rappelons ici que cette relation est de la forme : $PUIL = 0,55 (I_{\max} - 4)$.

Le calcul des lames ruisselées a été réalisé à partir des relations établies au sous-chapitre 10.1 et présentées au paragraphe 10.2.1. Nous présentons au tableau 10.11 les valeurs annuelles des lames ruisselées pour les trois bassins sélectionnés : El Muerto, Carboneras et Pastelero.

Tableau 10.11. Lames ruisselées reconstituées (période 1971-1983) et lames ruisselées observées (période 1996-1998) sur les bassins versants El Muerto, Carboneras et Pastelero.

Années	El Muerto		Carboneras		Pastelero	
	Pan	Lr	Pan	Lr	Pan	Lr
1971	383	13,7	376	12,9	358	7,9
1972	416	31,8	401	22,5	371	-
1973	587	53,8	576	36,3	557	35,6
1974	347	11,8	336	5,4	304	3,3
1975	293	5,8	284	2,9	265	6,8
1976	633	28,1	623	18,2	601	23,3
1977	431	7,2	419	6,6	401	16,4
1978	448	8,9	437	6,3	406	7,7
1979	355	23,4	346	13	326	21,6
1980	423	11,7	412	5,4	391	5,4
1981	425	18	417	10	400	10,5
1982	217	11,2	207	7,1	190	14,1
1983	457	33,2	453	22,4	436	43
1996	451	15,8	470	10,5	477	12,3
1997	357	5,1	410	1,6	376	1
1998	295	9,9	316	5,7	316	6,8

Les lames ruisselées (Lr) et les pluies annuelles (Pan) sont exprimées en mm.

Ce tableau montre que l'année 1997 peut être considérée comme exceptionnellement sèche en ce qui concerne les apports d'eau dans les trois retenues sélectionnées. Cette hydraulicité très faible des bassins versants, au regard d'une pluviométrie annuelle modérément déficitaire, s'explique par l'importance assez exceptionnelle des pluies d'hiver et de printemps qui totalisent, cette année là, près de 30 % de la pluie annuelle (Cf. tableau 6.2) et par le petit nombre de pluies journalières estivales supérieures à 20 mm : 2 en 1997 sur le bassin Carboneras, contre 4 en 1998 et 6 en 1996. Par ailleurs, les pluies de printemps ont provoqué un développement précoce de la végétation herbacée qui a eu pour effet de diminuer la valeur du coefficient de ruissellement dès le début de saison des pluies. Les apports de l'année 1996 sont supérieurs à la médiane et possèdent une période de retour comprise entre 2 et 3 ans. Ceux de l'année 1998 sont inférieurs à la médiane avec une période de retour comprise entre 3 et 4 ans.

10.4. Conclusion

Après calage du modèle quadratique sur l'année 1996, nous avons validé le modèle à l'aide des écoulements observés en 1997 et 1998. Cette nouvelle phase de validation nous a permis amélioré le calage des paramètres E (qui concerne le coefficient de croissance quadratique) et F (qui dépend de l'état d'humectation des sols) du modèle. Cette amélioration des paramètres est faite à partir de l'identification de deux comportements supplémentaires, au cours des années 1997 et 1998, de la relation pluie-lame ruisselée : l'un est en relation avec les conditions qui précèdent la saison des pluies, l'autre est noté à l'occasion des crues précédées d'une averse de plus de 10 mm dans un intervalle de temps de moins de 24 heures.

En ce qui concerne le début de la saison des pluies, les années 1996 et 1997 se caractérisent par des conditions radicalement différents. La saison pluvieuse estivale de l'année 1996 a été précédée d'une saison printanière pratiquement sans pluie et d'une année particulièrement sèche en 1995 (257 mm à la station Atotonilco où la moyenne annuelle est de 427 mm). L'absence de pluies sur cette long période a provoqué un faible développement du couvert végétal, condition qui a bénéficié aux premières crues de 1996. Par contre, en 1997, très déficitaire en écoulements, les fortes pluies printanières ont permis le développement précoce des plantes annuelles. Au printemps, l'existence de pluies permet le développement de la végétation car la température est alors assez élevée pour permettre la croissance du couvert végétal herbacé. Ainsi, en 1997 la saison pluvieuse estivale a commencé sur un couvert végétal plus développé qu'en 1996, ce qui peut expliquer les valeurs plus faibles du coefficient de croissance quadratique (E) observées sur les bassins versants El Viejo, Carboneras et El Tullido.

Quant aux averses de plus de 10 mm, séparées par un intervalle de temps de moins de 24 heures, la validation du modèle quadratique a permis de mettre en évidence leur comportement particulier. La seconde averse provoque en effet une crue plus forte que celle qui surviendrait avec un intervalle de temps supérieur à 24 heures. Néanmoins, le bassin versant El Viejo, situé sur matériaux rhyolitique, n'est pas concerné par ce comportement. Il semble que cette formation ait une meilleure capacité de drainage due d'une part aux fortes pentes sur lesquels il se trouve et d'autre part à l'absence des croûtes calcaires qui limitent le drainage interne des sols sur versants situés en aval des reliefs calcaires.

Après validation, le calage des paramètres E et F du modèle déterministe quadratique a permis l'amélioration des ajustements sur la plupart des bassins versants. L'utilisation du critère de Nash pour l'année 1996, montre en effet une amélioration très nette de ces ajustements pour les bassins versants au comportement très hétérogène (El Viejo, El Tullido et Pastelero). A l'issue de cette phase de validation du modèle quadratique, nous avons pu définir six types de bassins versants auxquels nous avons associé les valeurs correspondantes de cinq paramètres du modèle quadratique en faisant varier le paramètre F avec l'indice des pluies antérieures et le paramètre E en fonction de l'occurrence des averses.

La phase de transposition nous a permis d'établir une typologie des 61 bassins versants équipés de *presones* en utilisant trois critères : la géologie comme principal facteur explicatif de l'écoulement (cinq classes), la taille des bassins versants (trois classes), les pentes qui les caractérisent (deux classes) et le type de couvert végétal (trois classes). Les règles de transposition des paramètres du modèle déterministe quadratique des bassins versants étudiés aux autres bassins ont été définies à partir des relations établies au chapitre 9 par l'analyse en composantes principales (ACP). Compte tenu de la forte hétérogénéité spatiale des pluies, nous avons écarté de cette transposition les 6 bassins versants de taille supérieure à 5 km² pour lesquels il faudrait réaliser une étude complémentaire de la taille des noyaux pluvieux efficaces, c'est à dire de la variabilité spatiale des intensités pluviométriques. Pour les bassins versants de taille inférieure à cinq km², au nombre de 55, nous avons finalement établi des règles de transposition pour treize classes de bassins dont six correspondent aux bassins versants étudiés. Ces règles permettent théoriquement de reconstituer les lames ruisselées sur la plupart des bassins à partir de la connaissance de la pluie utile (PUIL) à l'échelle des bassins.

Enfin, la phase d'extrapolation nous a permis d'établir deux importantes relations à souligner :

- une relation entre la valeur de PUIL (principale variable explicative du ruissellement dans le modèle quadratique) et l'intensité maximale de pluie en 30 minutes qui mobilise 75 % des événements pluvieux,
- un rapport entre l'intensité maximale de pluie en 30 minutes et la pluie journalière qui varie de 0,5 à 2 avec une répartition des valeurs de ce rapport différente pour trois tranches de pluies journalières : 0 à 10 mm, 10 à 20 mm et plus de 20 mm.

La bonne relation entre la pluie utile et l'intensité maximale de pluie en 30 mn peut s'expliquer par le fait que plus de 75 % du total d'une averse tombe sur un intervalle de 30 minutes. On peut penser que cette caractéristique de la pluie bénéficie aussi bien à l'ajustement du modèle qu'à la reconstitution du ruissellement hors de la période des observations. Ainsi, nous avons reconstitué les lames ruisselées pour trois bassins versants étudiés sur une période de 13 années de pluies journalières disponibles à la station Atotonilco (1971-1983). La reconstitution des lames ruisselées sur trois bassins versants établit que le période de retour d'une année comme celle de 1996, supérieure à la valeur médiane, varie entre 2 et 3 ans. La période de retour d'une année comme celle de 1998, inférieure à la valeur médiane, varie entre 3 et 4 ans. L'année 1997 apparaît comme celle qui ruisselle le moins dans la période de reconstitution. Pour le bassin El Muerto, sa période de retour est comprise entre une année sur 15 et une année sur 20. Pour les bassins versants Carboneras et Pastelero, sa période de retour est largement supérieure à 20 ans.

QUATRIEME PARTIE

LES PETITS BARRAGES DANS LE RANCH ATOTONILCO

CHAPITRE 11 : Fonctionnement des petits barrages (presones)

CHAPITRE 12 : La gestion de l'eau dans le ranch Atotonilco

CHAPITRE 13 : Rôles actuel et potentiel des petits barrages

CHAPITRE 11

Fonctionnement des retenues d'eau (*presones*)

11.1 Caractéristiques des réservoirs

11.1.1. Principes de construction des petits barrages

Les premiers barrages de rétention du ranch Atotonilco (*presones* San Marcos et Sauz Mocho (figure 11.1) ont été construits à la fin du siècle dernier pour abreuver du bétail, alors essentiellement bovin et caprin. A cette époque, la construction des barrages met à contribution une forte disponibilité en main d'œuvre qui pouvait mobiliser de grands volumes de terre en utilisant des moyens rudimentaires de transport (charrettes ou *tartanas*). Vers le début du siècle, l'introduction des engins mécaniques dans les travaux agricoles facilita la construction des digues qui virent leur nombre augmenter sensiblement dans toute la région. Aujourd'hui, le ranch compte trois *scrapers* qui servent aussi bien à l'ouverture, à l'entretien des pistes d'accès qu'à la construction de nouvelles digues de rétention. Ce qui autrefois représentait de nombreuses journées de travail manuel est maintenant possible en une dizaine de jours avec une seule personne.

Vers la fin des années 20, le ranch fut divisé en de nombreux enclos pour adapter la densité d'animaux par hectare au potentiel en pâturages, ce qui augmenta les nécessités d'abreuvement sur les lieux mêmes du pâturage. Cette situation rendit obligatoire l'installation d'un réseau de puits complémentaires aux petits barrages. Les digues étaient au départ installées à l'intérieur des enclos, mais avec le temps et aussi la nécessité d'augmenter les voies d'accès au ranch, ces dernières furent mises à profit pour servir de digues de rétention sur les principaux cours d'eau qu'elles recoupaient. Cette pratique est encore maintenue actuellement, de telle sorte que, durant les deux dernières années, six barrages ont été installés ou redimensionnés en profitant de l'élargissement de la principale piste d'accès au ranch (*presón* Pastelero, El Gato, Islote, La Corónela, Cerro gordo et Peñasco, figure 11.1).

La construction des digues est confiée à des personnes qui comptent plus de 25 années d'expérience dans ce domaine. Ainsi, le dessin du déversoir de crues, la hauteur de la digue et la capacité de stockage sont définis de façon empirique à partir des connaissances acquises. Néanmoins, en certaines occasions, des débordements provoquent la détérioration de la digue, preuve d'un mauvais dimensionnement du déversoir de crues, ce qui oblige à des reconstructions fréquentes de certains ouvrages (*presón* Cerro Gordo en 1996 et 1997).

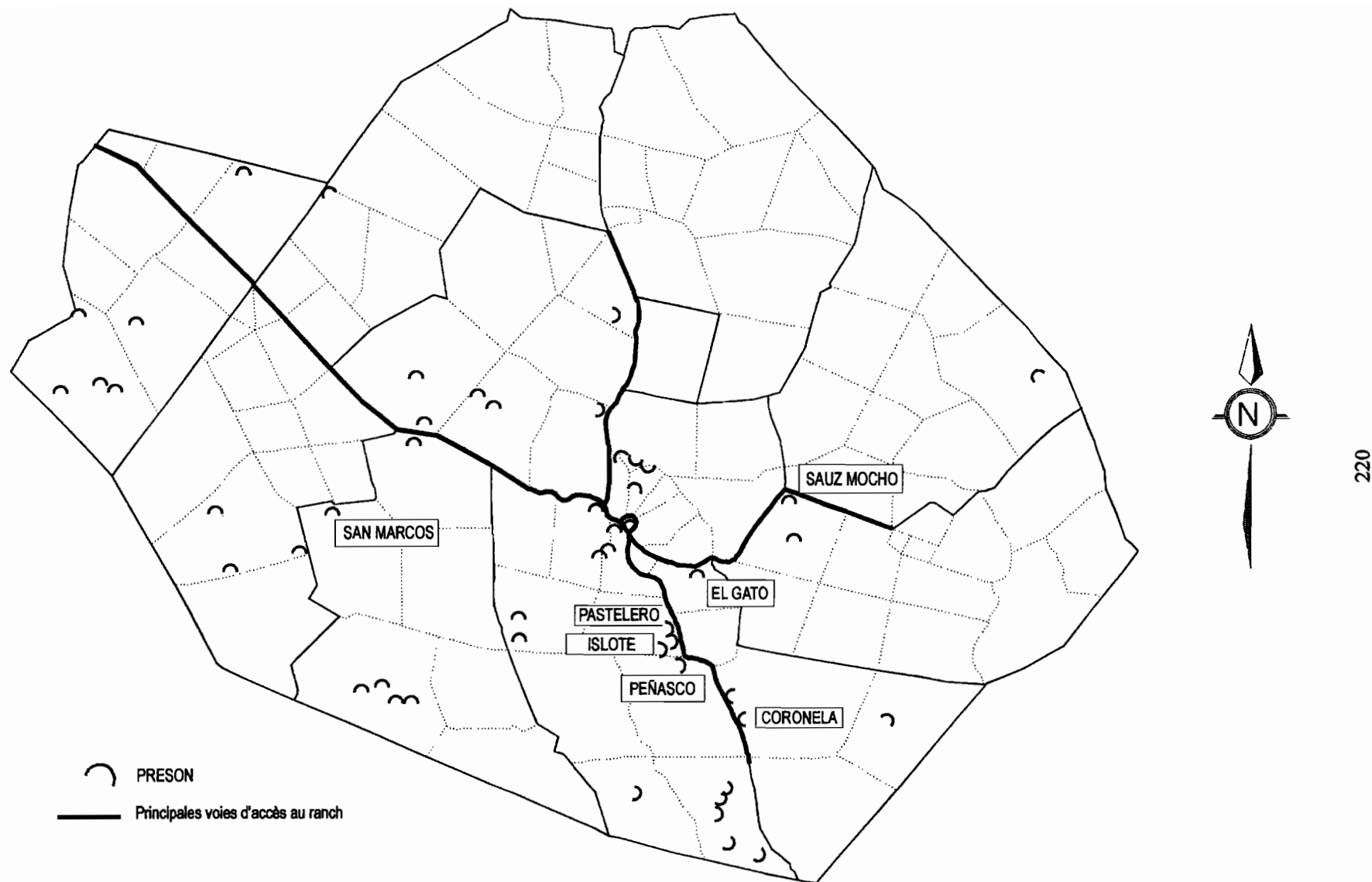


Figure 11.1. Localisation des *presas* dans le ranch Atotonilco.

11.1.2. Géométrie des petits barrages, typologie des *presones*

Nous avons vu au chapitre 7 que les levés topographiques effectués dans chacune des cuvettes étudiées ont permis de définir trois relations caractéristiques de leur géométrie :

- La relation cote - **volume d'eau emmagasiné**, qui définit le volume disponible ;
- la courbe cote - **superficie du plan d'eau**, qui représente l'aire exposée à l'évaporation ;
- la courbe cote - **superficie de contact avec le sol**, qui représente l'aire sur laquelle le volume d'eau est susceptible de s'infiltrer.

Ces superficies et les volumes emmagasinés ont été calculés en utilisant un maillage de points distants de 5 mètres, les interpolations étant faites par krigeage. Trois méthodes ont été testées : la méthode trapézoïdale, la méthode de Simpson's et celle de Simpson's 3/8. Les résultats obtenus sont sensiblement similaires.

L'analyse des relations cote - volume de chacune des retenues (figure 11.2) permet de différencier deux groupes de *presones* en fonction de leur capacité de stockage. D'une part les cuvettes de El Viejo, El Tullido et Pastelero qui ont les plus fortes capacités, et d'autre part celles de Carboneras, El Muerto, Oso Negro et El Molino qui sont nettement plus réduites.

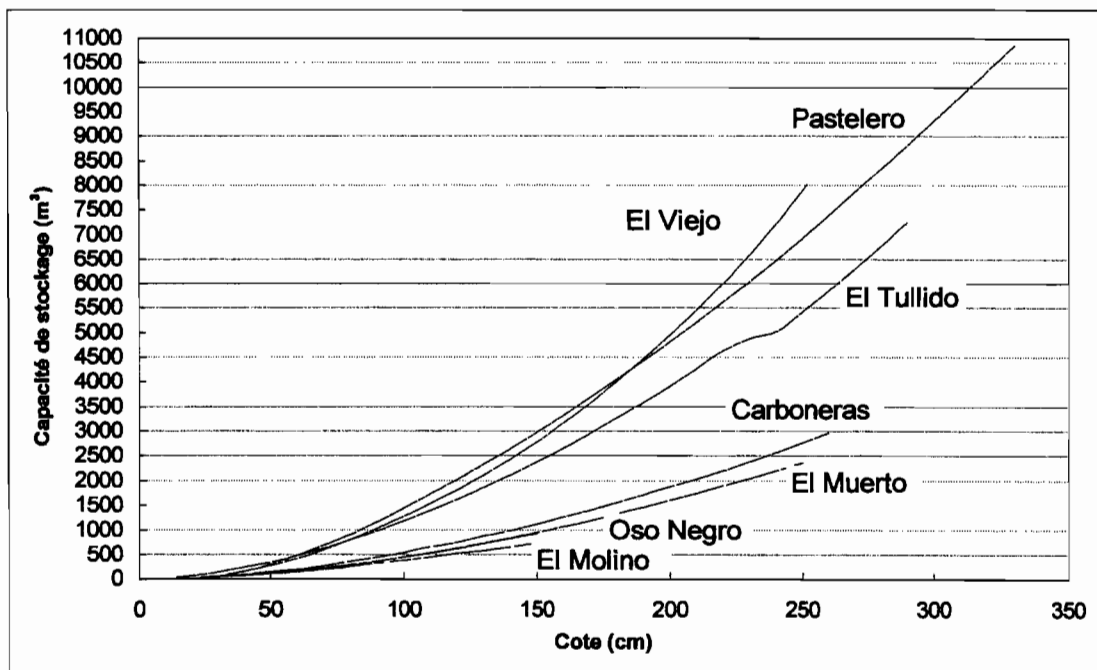


Figure 11.2. Courbes cotes-volumes des *presones* étudiés.

Si la finalité des *presones* est bien de stocker l'eau durant le maximum de temps possible pour alimenter directement le bétail, leurs formes géométriques doivent être telles qu'elles minimisent les pertes par évaporation (fonction de la superficie du miroir) et par infiltration (liée à la nature du substrat et de son recouvrement et à la surface mouillée), tout en ayant une capacité en eau

suffisante. Dans les cas de toutes les cuvettes étudiées, les superficies du miroir et les surfaces mouillées sont sensiblement identiques quelles que soient les cotes, comme le montrent les 2 exemples suivants.

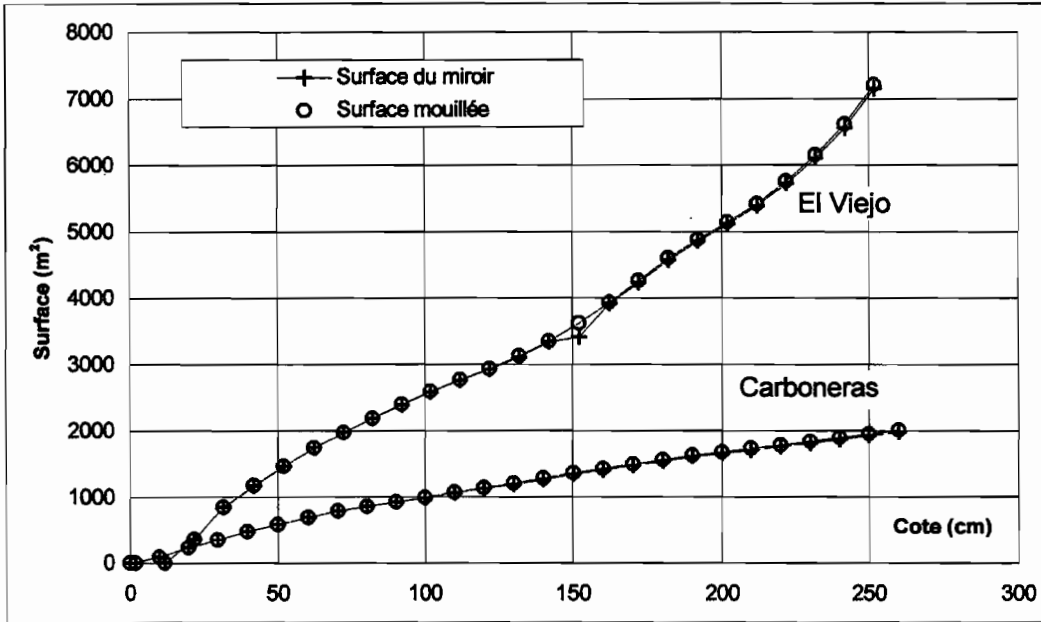


Figure 11.3. Courbes cotes / surfaces du miroir et cotes / surfaces mouillées des *presones* El Viejo et Carboneras.

Par contre, les relations entre les cotes et les volumes emmagasinés, les cotes et les superficies du miroir, les cotes et les surfaces mouillées ne présentent pas la même configuration pour les différentes cuvettes. La figure 11.4 présente d'abord la somme des superficies du plan d'eau et de superficie en contact avec le sol pour les *presones* Pastelero et El Viejo, ainsi que les volumes stockés et leurs cotes respectives. On peut remarquer qu'à la cote de 2,32 m, le *presón* El Viejo stocke seulement 580 m³ de plus que celui de Pastelero alors que ses superficies exposées à l'évaporation et à l'infiltration sont supérieures de près de 3500 m² à celles du *presón* Pastelero. Ceci met en évidence la mauvaise géométrie du *presón* El Viejo par rapport à celui de Pastelero.

Pour analyser la géométrie des retenues nous avons défini un indice IG comparant la somme des surfaces exposées à l'évaporation (miroir) et à l'infiltration (surface mouillée) d'une retenue à la somme de ces mêmes surfaces sur un quart de sphère. Cet indice géométrique est donc égal à 1 pour une forme de retenue minimisant la surface de contact avec l'atmosphère et avec le sol. La forme de cet indice est la suivante :

$$IG = \frac{2\pi \left(\sqrt[3]{\frac{3}{\pi} \cdot V} \right)^2}{(S_1 + S_2)}$$

où V est le volume stocké dans la retenue en m³,

S₁ est la surface du miroir en m²,

S₂ est la surface mouillée en m².

L'indice IG que nous proposons tient compte à la fois des surfaces exposées à l'évaporation d'une part et à l'infiltration d'autre part. En supposant que le fond de la retenue présente un comportement homogène à l'infiltration, cet indice peut être considéré comme un indicateur de l'efficacité de la forme géométrique de chaque cuvette pour stocker l'eau en minimisant les surfaces en contact avec l'air (miroir) et avec le sol (surface mouillée). Le tableau 11.1 contient les chiffres correspondants aux capacités maximales de ces mêmes retenues. L'analyse de ce tableau montre des indices géométriques à la cote normale, celle du déversoir, nettement plus faible pour les retenues El Viejo et El Tullido ($IG = 0,2$), celle de El Muerto, El Molino et Pastelero présentent les indices géométriques les plus forts ($IG = 0,35$ à $0,38$).

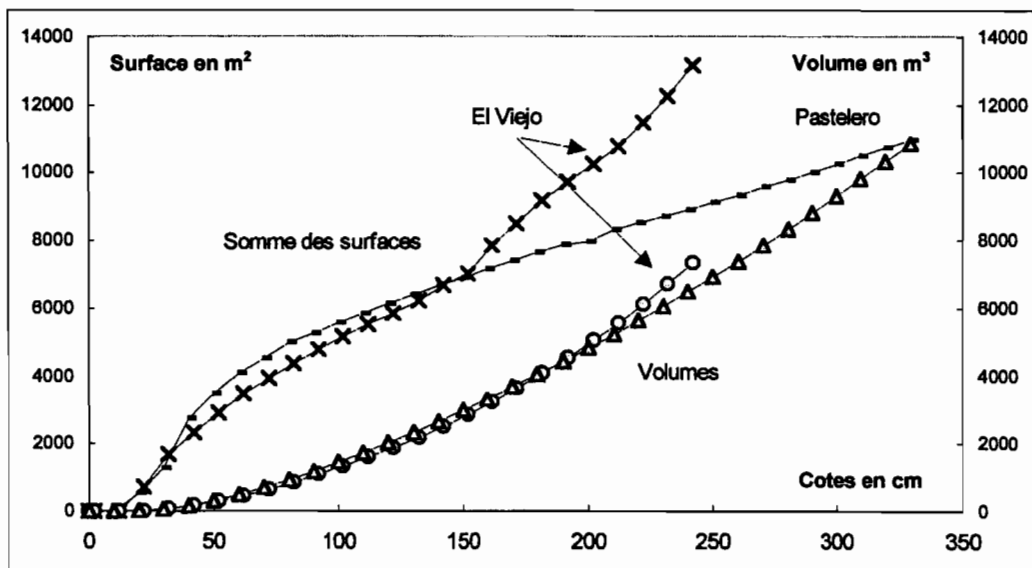


Figure 11.4. Relations entre cotes et volumes, cotes et sommes des surfaces exposées à l'air et en contact avec le sol pour les *presones* El Viejo et Pastelero.

Tableau 11.1. Caractéristiques géométriques des *presones*.

Preson	Capacité de stockage m^3	Superficie du miroir m^2	Superficie mouillée m^2	Longueur m	Largeur m	Longueur de la digue m	Largeur du déversoir m	Cote maximale m	Indice IG
Carboneras	1880	1650	1675	60,2	27,4	50,41	8,94	2	0,28
El Viejo	6720	6110	6152	168,8	36,2	41,25	8,75	2,32	0,18
El Tullido	4783	3812	3927	104,2	36,6	44,07	16,95	2,26	0,22
Pastelero	15540	5380	5595	122,9	43,8	72,92	10,42	3,30	0,35
El Muerto	2300	1400	1414	64,1	21,8	51,28	9,62	1,9	0,38
Oso Negro	1140	1094	1126	81,2	13,5	32,4	8,6	1,8	0,30
El Molino	730	702	715	42,0	16,7	17,3	5,2	1,5	0,35

Toutes choses étant égal par ailleurs, les faibles valeurs de l'indice géométrique laissent présager des durées de stockage plus limitées dans les retenues pour lesquelles cet indice est le plus faible, c'est à dire pour les retenues El Viejo et El Tullido.

11.2 Variation du stock d'eau dans les retenues

Le sous-chapitre 7.2 décrit en détail la méthodologie utilisée pour la mesure des niveaux d'eau en période de crue et d'étiage. On rappellera seulement que chacun des sept *presones* a été équipé d'un pluviomètre, d'une échelle limnimétrique, d'un limnigraphe et, pour l'un d'entre eux, El Viejo, d'un bac classe A.

Pour obtenir le bilan journalier de l'eau dans les retenues, les limnigrammes ont été digitalisés et interprétés à l'aide du programme HYDROM2 (Orstom 1989). On obtient ainsi l'historique des cotes constitué de couples temps-hauteur d'eau dans la retenue. A partir de ces chroniques ont été calculées les hauteurs moyennes journalières pour chacune des retenues, tant en période d'étiage qu'en période d'écoulement sans débordement. Dans le cas des crues avec débordement, la cote moyenne a été calculée sans prendre en compte les cotes enregistrées au dessus du déversoir, ce qui permet de séparer le volume emmagasiné du volume déversé. La figure 11.5 présente les valeurs moyennes journalières du niveau d'eau calculé pour chacun des *presones* durant les saisons des pluies 1996 et 1997.

Les limnigraphes utilisés enregistrent les niveaux d'eau toutes les 10 minutes environ avec une précision de l'ordre du centimètre (Cf. chapitre 7, paragraphe 7.2.1). Outre les erreurs dues à la précision de ces limnigraphes, d'autres facteurs peuvent influencer la qualité des données. L'analyse des observations journalières aux échelles limnimétriques montre que certaines erreurs de lecture peuvent être induites par un simple changement d'observateur ou par l'appréciation du niveau d'eau sur l'échelle en présence de clapot. Dans ce dernier cas, la précision maximale de mesure sur l'échelle peut passer de 0,5 à 1 ou 1,5 centimètre. Outre ces deux types d'erreurs, en période d'étiage, quand le niveau d'eau descend très lentement, les limnigraphes peuvent présenter des problèmes de transmission mécanique provoquant un enregistrement en escalier (figure 11.5). Toutes ces sources d'erreurs sont néanmoins ponctuelles, non cumulatives et peuvent être corrigées.

Le mode de traitement communément utilisé pour atténuer ce type d'erreurs consiste à calculer les moyennes mobiles de la série de données. Dans notre cas, pour connaître le niveau d'eau (H_j) d'un certain jour (j), on calcule la moyenne des mesures des deux jours précédents (H_{j-1} , H_{j-2}) et des deux jours suivants (H_{j+1} , H_{j+2}) du jour (j). C'est à dire que pour le jour (j) la hauteur (H) du niveau d'eau observé est :

$$H_j = (H_{j-2} + H_{j-1} + H_j + H_{j+1} + H_{j+2}) / 5$$

La figure 11.6 présente les valeurs observées du niveau de l'eau dans la retenue de Carboneras ainsi que les résultats obtenus à partir de la moyenne mobile. Le même traitement a été effectué pour toutes les retenues et les valeurs obtenues ont servi de base pour le calcul du bilan d'eau dans les *presones*.

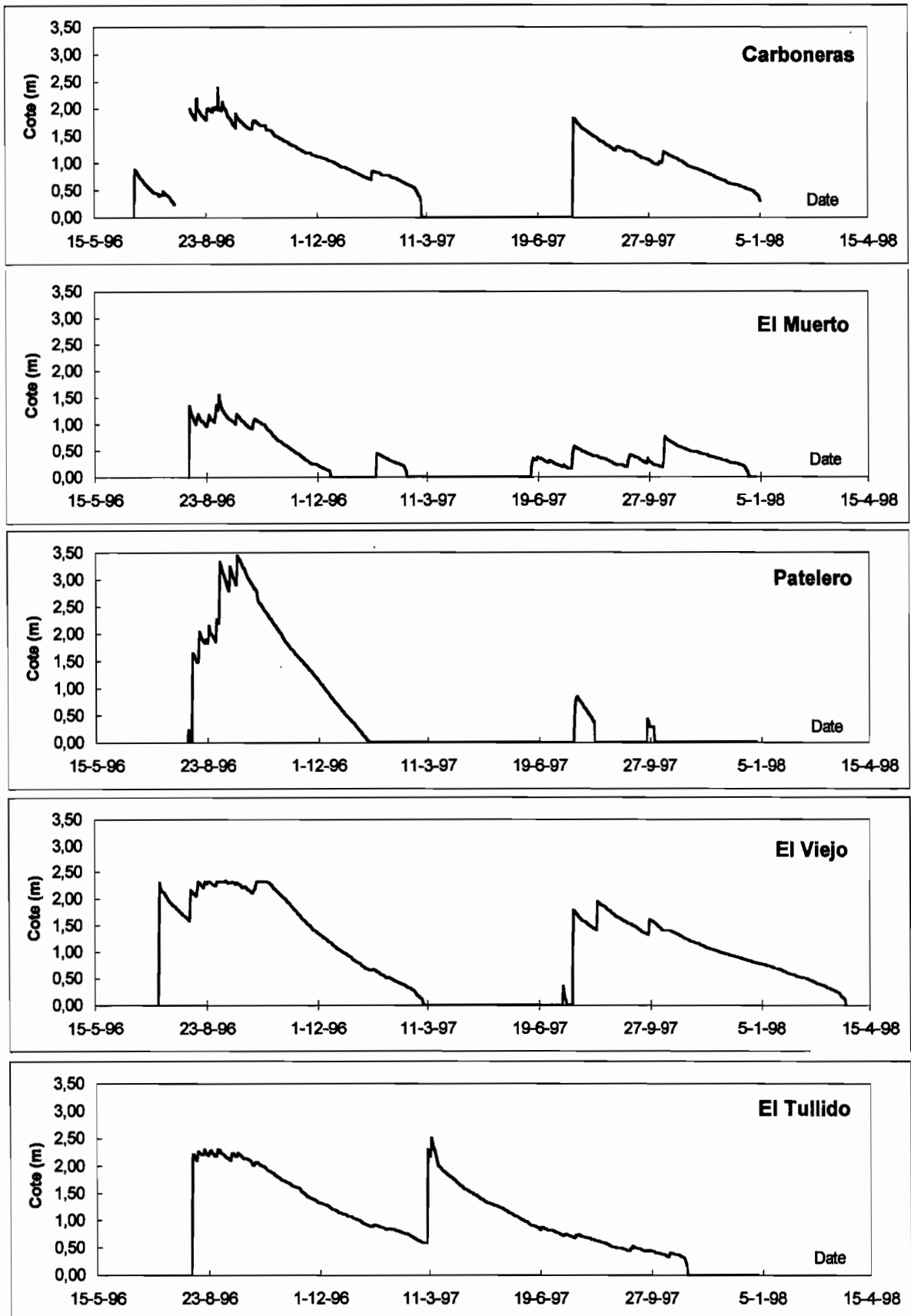


Figure 11.5. Chroniques des cotes moyennes journalières sur 5 presones du ranch Atotonilco.

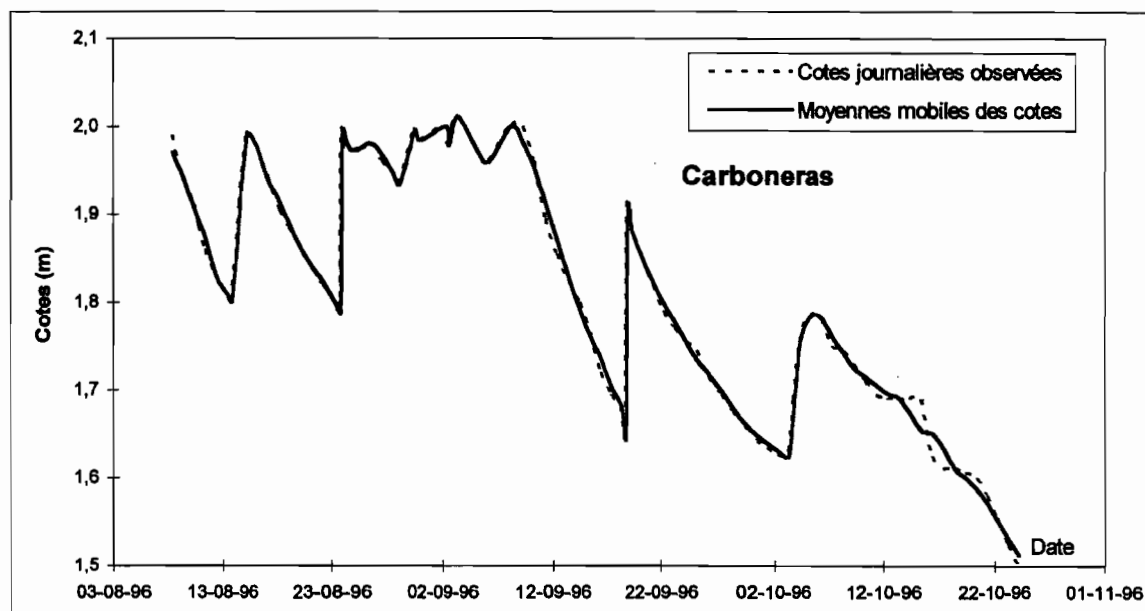


Figure 11.6. Chroniques des cotes moyennes journalières observées et calculées à partir des moyennes mobiles pour le *presón* Carboneras.

A partir des hauteurs moyennes journalières du plan d'eau et des relations cotes-volumes des différentes cuvettes, les volumes d'eau emmagasinés ont été calculés pour les 5 retenues mises en eau durant les saisons des pluies 1996 et 1997. La variation hebdomadaire de ces volumes est présentée sur la figure 11.7.

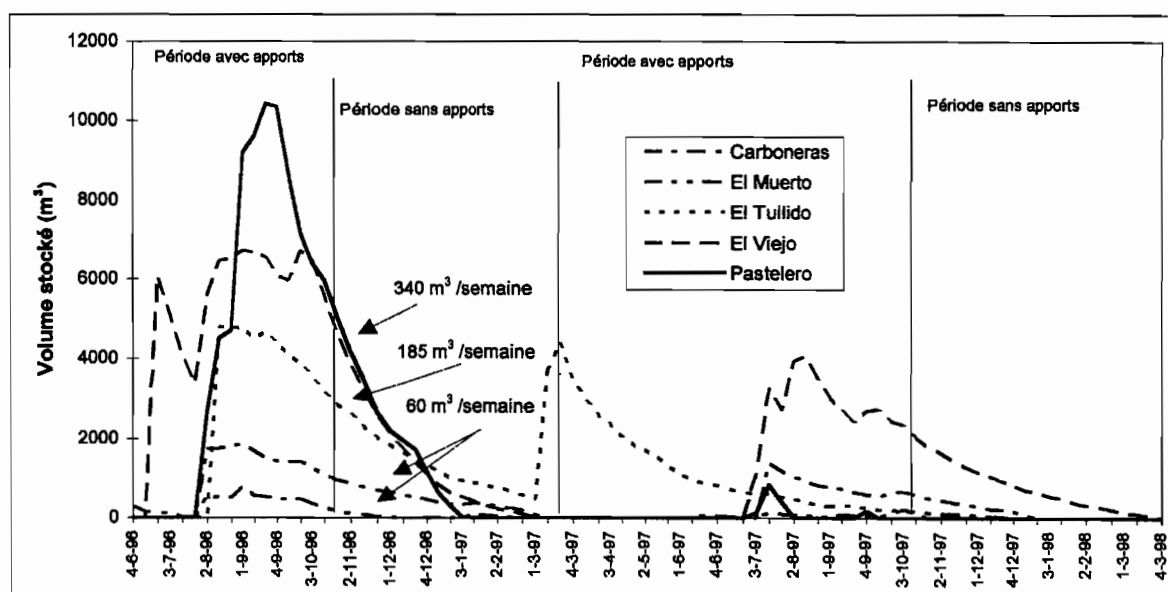


Figure 11.7. Chroniques des volumes moyens hebdomadaires stockés dans cinq retenues du ranch.

La figure 11.7 montre que les écoulements de la saison 1996 ont été supérieurs à ceux de 1997. Le volume total emmagasiné dans ces 5 retenues a été de 47 000 m³ en 1996 et seulement de 10 300 m³ en 1997, malgré des pluviométries totales annuelles très semblables. La différence dans la production d'écoulements est due au fait que les événements pluvieux de l'année 1997, bien que plus nombreux que ceux de 1996, ont été individuellement moins importants au plan quantitatif (Cf. chapitres 6 et 10). Ceci est à mettre en relation avec la complexité et la variabilité des phénomènes pluvieux dans les régions semi-arides nord-mexicaines (Descroix et al. 1997; Estrada et al. 1993; Nouvelot et Descroix 1996).

La figure 11.7 met aussi en évidence la variation des volumes d'eau accumulés durant les périodes de crue et d'étiage. Une analyse de ces variations durant la période d'étiage 1996 permet de différencier trois taux d'abaissement du plan d'eau dans les cuvettes :

- un fort abaissement de 340 m³ par semaine dans les retenues de El Viejo et Pastelero,
- un abaissement modéré de 185 m³ par semaine dans la retenue de El Tullido,
- un abaissement faible de 60 m³ par semaine dans les retenues de Carboneras et de El Muerto.

Ces taux d'abaissement sont en relation avec les temps de séjour de l'eau dans les différentes cuvettes. Les retenues ayant la plus faible capacité de stockage ont gardé l'eau le plus longtemps. La seule analyse de la période sans écoulement de l'année 1996 montre que l'eau s'est maintenue durant 19 semaines dans le *presón* Carboneras et 15 semaines dans le *presón* Pastelero. Au début de cette période, les volumes stockés étaient de 1275 m³ pour Carboneras et de 6400 m³ pour Pastelero.

Trois processus déterminent la durée de séjour de l'eau dans les cuvettes de rétention : son évaporation, son infiltration au fond de la cuvette et sa consommation directe par le bétail ou indirecte par prélèvement pour l'alimentation en eau des abreuvoirs. Nous allons donc étudier successivement ces trois processus en commençant par l'évaporation, en estimant la consommation et en déterminant l'infiltration par l'utilisation de l'équation du bilan d'eau dans les retenues en période sèche.

11.3 Bilan hydrique des réservoirs

11.3.1. Calcul du bilan

Nous avons présenté au paragraphe 7.2.1 l'équation du bilan de l'eau dans les retenues en détaillant son utilisation pour la détermination des apports en période de crues et de l'infiltration en période sèche. La forme générale de cette équation est la suivante:

$$\Delta V = (V_r + V_s + V_p) - (V_{ev} + V_d + V_{id} + V_i + V_u)$$

- ΔV est la variation du volume d'eau stocké dans la retenue,
- V_r est le volume des apports superficiels dus au ruissellement sur le bassin versant,
- V_s est le volume des apports souterrains,

- V_p est le volume des apports pluviométriques tombant sur la retenue,
- V_{ev} est le volume d'eau évaporé,
- V_d le volume déversé,
- V_{id} le volume infiltré au travers de la digue,
- V_i le volume infiltré au fond de la retenue,
- V_u le volume d'eau utilisé.

En période sèche, l'équation du bilan se ramène à l'équation 4 du chapitre 7 :

$$\Delta V = V_s - (V_{ev} + V_{id} + V_i + V_u)$$

Bien que l'on suppose les apports souterrains très petits, étant dans l'impossibilité d'en distinguer les différents termes, on continuera à les prendre en compte en définissant une variable globale d'infiltration V'_i égale à la différence entre les apports souterrains et les pertes par infiltration ($V'_i = V_s - V_{id} - V_i$). Sachant que l'évaporation V_{ev} et la consommation du bétail peuvent être estimées directement, le terme V'_i sera la seule inconnue restante de l'équation du bilan en période sèche :

$$V'_i = \Delta V - V_{ev} - V_u$$

Calcul de l'évaporation dans les retenues (V_{ev})

Pour les *presones* étudiés, le calcul de l'évaporation a été effectué à partir de deux relations : la relation altitude - évaporation et la relation entre l'évaporation sur le bac classe A et l'évaporation sur le bac flottant (Cf. chapitre 6, paragraphe 6.2).

Le gradient altitudinal d'évaporation (chapitre 7, paragraphe 7.2.2) permet de calculer pour chacune des cuvettes de rétention, situées à différentes altitudes, l'évaporation d'un bac de classe A situé à proximité (tableau 7.3), tandis que la seconde relation permet de calculer l'évaporation des retenues à partir de celle du bac de classe A. Ces équations ont été établies en considérant que l'évaporation a un comportement linéaire entre les cinq altitudes du réseau d'évaporimètres.

Ce mode de calcul ne donne qu'une estimation grossière de l'évaporation des retenues mais elle suffit généralement à résoudre l'équation du bilan d'eau pour déterminer l'infiltration lorsque son importance est sensiblement du même ordre de grandeur que celle de l'évaporation.

Estimation de la consommation d'eau

L'eau stockée dans les retenues du ranch est uniquement utilisée pour l'abreuvement du bétail. Il y a néanmoins plusieurs formes d'utilisation : l'utilisation directe par le bétail, l'extraction par siphonnage et la dérivation par gravité vers des abreuvoirs situés en aval. Dans le cas des 7 *presones* étudiés, l'utilisation se limite à un abreuvement direct par le bétail dans la cuvette sans qu'aucune autre extraction par siphonnage ou dérivation ne soit effectuée.

L'estimation de la consommation d'eau est faite à partir des besoins journaliers du bétail, qui varient avec le nombre total de têtes par enclos dont dépend le *presón*, selon l'âge et le sexe de l'animal. Anaya et Barral (1995) estiment que les bovins de race Herford, élevés dans une région semi-aride comme celle du ranch Atotonilco, consomment en moyenne journalière 40 litres d'eau dans le cas d'une vache adulte, 50 litres dans le cas d'un taureau et 30 litres pour un veau. Le nombre d'animaux par enclos est déterminé à partir de l'inventaire du bétail effectué chaque année pour l'ensemble des enclos du ranch. L'inventaire de l'année 1998 présenté en annexe XI.1 est très semblable à ceux de 1996 et 1997. La consommation d'eau correspondant au *presón* étudié est finalement définie en divisant les besoins totaux du bétail par le nombre total de retenues et d'abreuvoirs à l'intérieur de chaque enclos considéré. Le tableau 11.2 résume les estimations de consommation pour chacun des *presones*, ainsi que le nombre d'animaux et d'abreuvoirs présents dans chacun des enclos étudiés.

Tableau 11.2. Consommation en eau par *presón*.

Nom du <i>Presón</i>	El Muerto	Carboneras	El Viejo	Pastelero	El Tullido
Caractéristiques de l'enclos					
Nom de l'enclos	Cerro Acho	Cerro Ancho	San Miguel	El Pilon	El Mezquite
Superficie de l'enclos (ha)	450	450	550	415	750
Nombre d'abreuvoirs placés dans l'enclos	5	5	6	3	5
Nombre de têtes de bétail dans l'enclos	53	53	150	28	73
Consommation moyenne journalière d'eau du bétail (l/j/tête)	40	40	30	40	40
Durée de l'eau dans la retenue (jours)					
Pour la saison des pluies de l'année 1996	128	265	238	147	212
Pour la saison des pluies de l'année 1997	222	168	249	25	235
Total	350	433	487	172	447
Consommation d'eau dans la retenue					
Consommation d'eau dans le <i>presón</i> m ³ /j	0,42	0,42	0,75	0,37	0,58
Consommation totale d'eau pour les saisons 1996 et 1997 (m ³)	148	184	365	64	261

11.3.2. Résultats

Le bilan d'eau annuel dans les retenues a été réalisé en distinguant les périodes sèches des périodes de crues. En période sèche, l'équation du bilan d'eau fournit une bonne estimation de l'infiltration. Par contre, en période de crue il est impossible d'utiliser l'équation du bilan pour estimer l'infiltration. Cependant, la durée des crues dépasse rarement deux heures (Cf. chapitre 7). Il est donc possible d'estimer l'infiltration d'un jour de crue par la moyenne pondérée des infiltrations des jours qui précèdent et suivent la crue en tenant compte de l'heure du maximum pour déterminer le coefficient de pondération. Durant la saison des pluies de l'année 1996, 14 événements pluvieux en moyenne ont provoqué des écoulements sur 5 des 7 bassins versants étudiés, alors qu'en 1997 cette moyenne se réduit à seulement 3 ou 4 événements.

Les valeurs de l'infiltration et de l'évaporation présentées sur la figure 11.8 (A et B) sont les valeurs moyennes de 5 jours d'observations sur les retenues de El Viejo et Pastelero. Cette moyenne sur 5 jours permet de limiter les erreurs de calcul de l'évaporation dans les retenues. En effet, le calcul journalier du bilan d'eau dans les *presones* permet de mettre en évidence de petites périodes au cours desquelles la valeur calculée de l'évaporation est supérieure à l'abaissement du niveau d'eau sur l'échelle, avec une infiltration nulle. Or, dans les *presones* étudiés, l'infiltration peut difficilement avoir une valeur nulle, même durant de petites périodes. Ces erreurs sont probablement induites par l'estimation de l'évaporation dans la cuvette à partir d'une relation altitudinale linéaire.

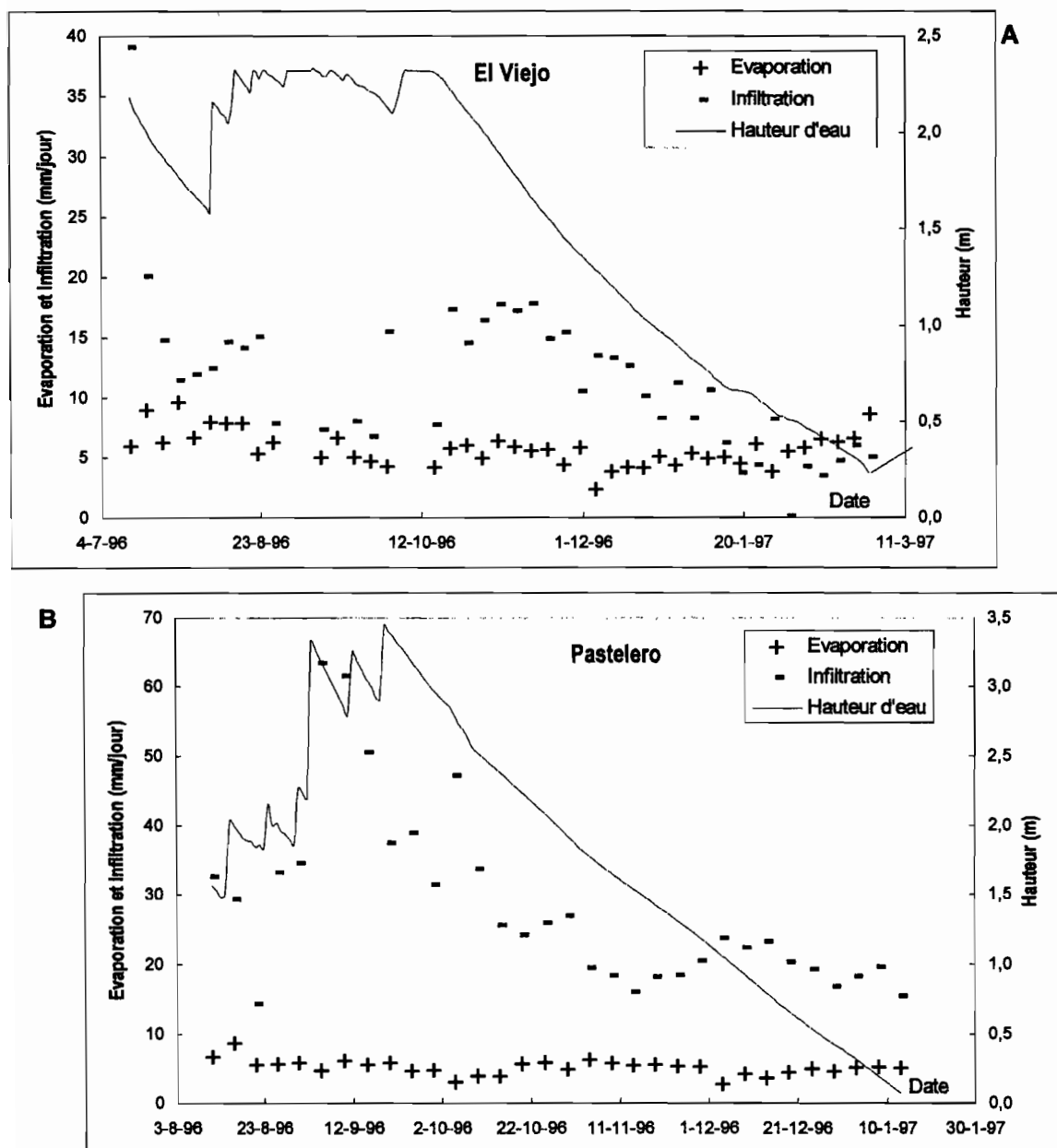
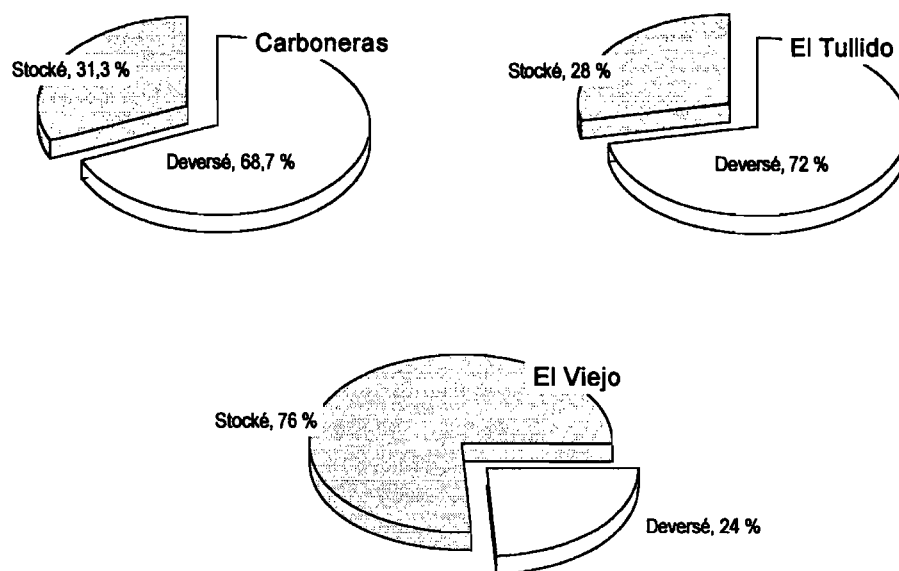


Figure 11.8. Valeurs moyennes de l'infiltration et l'évaporation de 5 jours d'observations sur les retenues de El Viejo (A) et Pastelero (B)

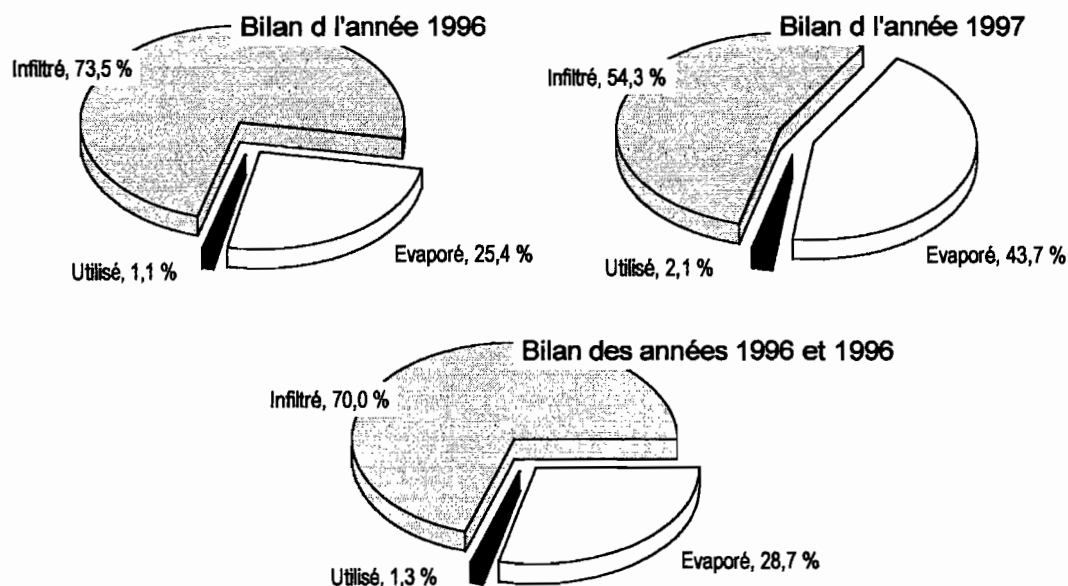
D'après ces 2 figures, les volumes évaporés sont faibles et stables par rapport aux volumes infiltrés, notamment dans la retenue de Pastelero, la plus profonde ($H_{max} = 3,3$ m, tableau 11.1). L'infiltration y est très forte en hautes eaux. Elle a tendance à se stabiliser au-dessous de la cote 2,5 m. Cela conforte l'hypothèse que, contrairement à la Tunisie (Albergel J. et al. 1999), dans le ranch Atotonilco l'infiltration joue un rôle plus important que prévu. Le fait que le fond et les berges des *presones* soient totalement modifiés par les scrapers intervient certainement dans l'importance des infiltrations mais la raison principale est très certainement à rechercher dans la nature du substratum : souvent très argileux ou marneux en Tunisie alors que les substratums du ranch Atotonilco sont constitués de matériaux perméable formés de roches éruptives acides ou basiques fissurées ou de roches détritiques peu consolidées.



Sur les 7 *presones* observés durant les années 1996 et 1997, 5 ont reçu des écoulements et 3 ont subi des déversements importants en 1996, considérée comme une année légèrement supérieure à la moyenne (Cf. chapitres 7 et 10). Les retenues de Carboneras et de El Tullido ont du laisser partir environ 70% des écoulements, celle de El Viejo près de 23%. Il apparaît donc que le choix des sites et la définition de la capacité de stockage des retenues ne sont pas très bien maîtrisés par les gestionnaires du ranch. L'étude hydrologique précédente pourrait donc fournir une estimation des apports annuelles en fonction de la nature des bassins versants et de la pluviométrie, ce qui permettrait d'améliorer la construction des *presones* en évitant le surdimensionnement des ouvrages.

Au cours de la saison des pluies 1997, aucune des retenues n'a présenté de débordement mais cette année peut être considérée (Cf. chapitre 10, paragraphe 10.3.5) comme exceptionnellement faible en ce qui concerne les écoulements (tableau 10.11) puisque l'année 1997

présente, sur les deux périodes des treize années reconstituées (1971 à 1983) et des trois années observées (1996 à 1998), la plus faible lame ruisselée. Sa période de retour peut être évaluée approximativement à une année sur vingt. Quant à l'année 1996, hydrauliquement plus favorable que la médiane, sa période de retour est comprise entre une année sur deux et une année sur trois.



L'analyse des volumes d'eau utilisés dans les petits barrages par rapport aux volumes totaux stockés en 1996 (tableau 11.3), montre que ceux-ci varient entre 0,3 et 2,6 % dans le meilleur des cas. Le presón Pastelero est celui qui présente le plus faible pourcentage d'utilisation, alors que celui de El Muerto a le pourcentage le plus fort. Durant l'année 1997, les pourcentages utilisés augmentent légèrement, en raison de la faiblesse des apports, passant de 0,3 à 0,56 et de 2,6 à 3,6 %. Dans tous les cas de figure, les retenues sont très peu utilisées, alors que c'était l'objectif avoué de leur construction.

Les volumes évaporés dans les retenues en 1996 représentent entre 15 et 38 % des volumes stockés, tandis que les volumes infiltrés représentent entre 61 et 85 %. Durant la saison des pluies 1996, tous les barrages étudiés ont subi de plus fortes pertes par infiltration que par évaporation. Par contre, au cours de l'année 1997 l'infiltration représente entre 30 et 85 % des volumes stockés et l'évaporation entre 16 et 70 %. Durant les deux années, le *presón* Pastelero possède les plus forts pourcentages d'eau infiltrée et les plus faibles pourcentages d'utilisation.

Tableau 11.3. Bilan des volumes d'eau pendant les saisons des pluies 1996 et 1997.

	<i>Presón</i>	Ecoulé	Déversé	Volumes exprimés en m ³			
				Stocké	Evaporé	Utilisé	Infiltré
1996	El Muerto	2345	0	2345	473	60	1812
	Carboneras	12152	8351	3801	1291	97	2413
	El Tullido*	34815	25071	9744	3688	121	5935
	Pastelero	18281	0	18281	2725	54	15502
	El Viejo	16934	3860	13074	3842	181	9050
1997	El Muerto	368	0	368	250	10	108
	Carboneras	1675	0	1675	871	60	743
	Pastelero	1606	0	1606	259	9	1338
	El Viejo	6655	0	6655	3122	133	3400

* Bilan des années 1996 et 1997

Ces bilans remettent en cause l'objectif annoncé d'utilisation des *presones* pour abreuver le bétail. Il s'avère que les retenues sont en priorité des réservoirs d'infiltration, mécanisme qu'il convient donc maintenant d'analyser.

11.4 Les mécanismes de l'infiltration dans les retenues d'eau

Dans les retenues d'eau étudiées, nous avons vu au paragraphe précédent que les pertes par infiltration ont représenté 71 % du volume stocké en 1996 et 52 % en 1997. Cette perte n'est cependant pas identique pour toutes les retenues et varie d'une année à l'autre. Elle dépend de la hauteur d'eau dans la retenue et de son degré de colmatage.

11.4.1. Mesures directes

Les mesures d'infiltration effectuées en différents points des cuvettes avaient pour objectif de connaître aussi bien la perméabilité des sédiments du fond des cuvettes que celles de leurs bords et des digues. Les sédiments sont constitués essentiellement par des argiles et des matières organiques fines. Le pourcentage de particules fines inférieures à 2 μm est de 44 % en moyenne pour la cuvette de Carboneras. Il atteint 60 % en moyenne dans la cuvette du *presón* El Tullido, (Loyer et Plenecassagne 1996). En période de dessèchement, les sédiments se fissurent par rétraction formant des prismes hexagonaux délimités par des fentes de retrait dont la largeur peut atteindre 15 cm. Nous avons utilisé un infiltromètre de type Müntz suffisamment grand pour intégrer cette hétérogénéité fissurale, avec 1 m² de superficie pour l'anneau central et 7 m² pour le seul double anneau extérieur. Sur la digue du *presón*, en raison de la forte pente, l'infiltromètre utilisé est un modèle dont les anneaux intérieurs et extérieurs ont respectivement des superficies de 100 et 800 cm² (Nouvelot 1993). Ces deux types de mesures de perméabilité ont été réalisés sur les *presones* de El Muerto, Carboneras, El Tullido et El Molino. Sur le *presón* Pastelero ces mesures ont été faites uniquement sur le fond de la cuvette. Dans tous les cas, les essais ont été effectués avec une charge constante de 10 cm d'eau, la durée des mesures variant entre 6 et 24 heures. Le tableau 11.4 présente un résumé des valeurs mesurées sur chacun des *presones*. L'ensemble des résultats figure en annexe XI.2.

Tableau 11.4. Infiltration limite constante, en mm/jour, sous une charge de 10 cm d'eau, dans les cuvettes des *presones*.

	El Muerto	Carboneras	El Tullido	Molino	Pastelero
Fond de la retenue	5,8	6,1	7,1	130	167
Sur le bord	80	27	41	263	-

Infiltration en mm/jour

Les résultats obtenus montrent une grande variabilité des taux d'infiltration et des valeurs toujours plus fortes sur les bords que sur les fonds, ce qui est logique compte tenu du colmatage du fond des retenues par les sédiments. Le *presón* de El Molino (sur basalte), avec des écoulements insignifiants en 1996 et 1997, présente un fort taux d'infiltration tant dans le fond de la cuvette (130 mm/jour) que sur ses bords (263 mm/jour). Celui de Pastelero, après entretien, présente le plus fort taux d'infiltration Muntz avec 167 mm/jour au fond de la cuvette. On peut supposer que ce taux approche les 300 mm/jour sur ses bords.

Il est évident que ces taux d'infiltration, mesurés expérimentalement sous une charge constante de 10 cm, ne peuvent être strictement comparés aux conditions naturelles auxquelles sont soumises les retenues qui, pour la majorité d'entre elles, ont supporté des charges d'eau de plus de 2 mètres en 1996. Elles mettent néanmoins en évidence des tendances et de nettes différences de comportement entre le fond et les bords des cuvettes, ainsi qu'entre les différents *presones* eux-mêmes. Les résultats expérimentaux vont dans le même sens que les pertes par infiltration estimées dans le calcul du bilan d'eau. La retenue de Pastelero présente, par exemple, les plus forts taux infiltrés dans les deux cas.

11.4.2. Analyse des lames infiltrées en fonction des hauteurs d'eau

L'analyse de la relation entre les taux d'infiltration observés sous conditions naturelles et les hauteurs d'eau dans les retenues montre des différences significatives, tant au plan spatial que temporel. Sur les figures 11.8 A et B (sous-chapitre 11.3.2) par exemple, qui montrent les valeurs moyennes de hauteur d'eau, d'évaporation et d'infiltration pour les *presones* El Viejo et Pastelero, la valeur moyenne de l'infiltration est respectivement de 8 et 20 mm/jour. Ces figures mettent également en évidence que le taux d'infiltration est en relation directe avec la hauteur d'eau et la période considérée. Pour le *presón* El Viejo ce taux d'infiltration atteint 37,5 mm/jour en début de saison des pluies 1996 à la cote 2,2 m et seulement 15 mm/jour en fin de saison à la même cote.

Analyse de l'infiltration dans le temps

L'analyse de l'infiltration a été faite à deux niveaux d'échelle temporelle : au niveau annuel pendant la saison des pluies et au niveau interannuel en comparant l'infiltration des années 1996 et 1997. Dans le premier cas, l'analyse n'a été possible que pour les *presones* Carboneras et El Viejo ; dans le second cas elle concerne tous les *presones* étudiés à l'exception du *presón* Pastelero.

Analyse correspondant à la saison des pluies

Pour les retenues Carboneras et El Viejo, deux périodes de déstockage continu ont pu être observées au cours de l'année 1996 : l'une en début de saison des pluies, l'autre en cours de saison. Les figures 11.9 A et B présentent les taux d'infiltration estimés durant ces deux périodes pour ces deux retenues. Ces figures montrent que les taux d'infiltration sont plus forts au début de la saison des pluies, même si cela est moins flagrant pour la retenue El Viejo. Dans le *presón* Carboneras, pour un niveau d'eau de 80 cm, la vitesse d'infiltration est proche de 25 mm/jour durant la première période. Elle est inférieure à 5 mm/jour durant la seconde. Cette différence des vitesses d'infiltration est due à l'état des sédiments en fin de saison sèche et à leur forte rétraction sous l'effet de la dessiccation. En début de saison pluvieuse ils présentent donc une forte capacité temporaire d'infiltration. Ainsi, durant les mesures de perméabilité dans le fond de la cuvette, 2 m³ d'eau ont été nécessaires pour saturer les 7 m² de l'anneau extérieur de l'infiltromètre, ce qui représente une lame d'eau de 28,6 cm. C'est à dire que pour atteindre un niveau d'eau de 80 cm dans la retenue, il est d'abord nécessaire d'avoir un écoulement correspondant à une lame d'eau de 28 cm sur le fond de la retenue, cette lame servant uniquement à saturer les sédiments fissurés. Il faut ensuite attendre quelques jours pour atteindre un régime d'infiltration plus stabilisé.

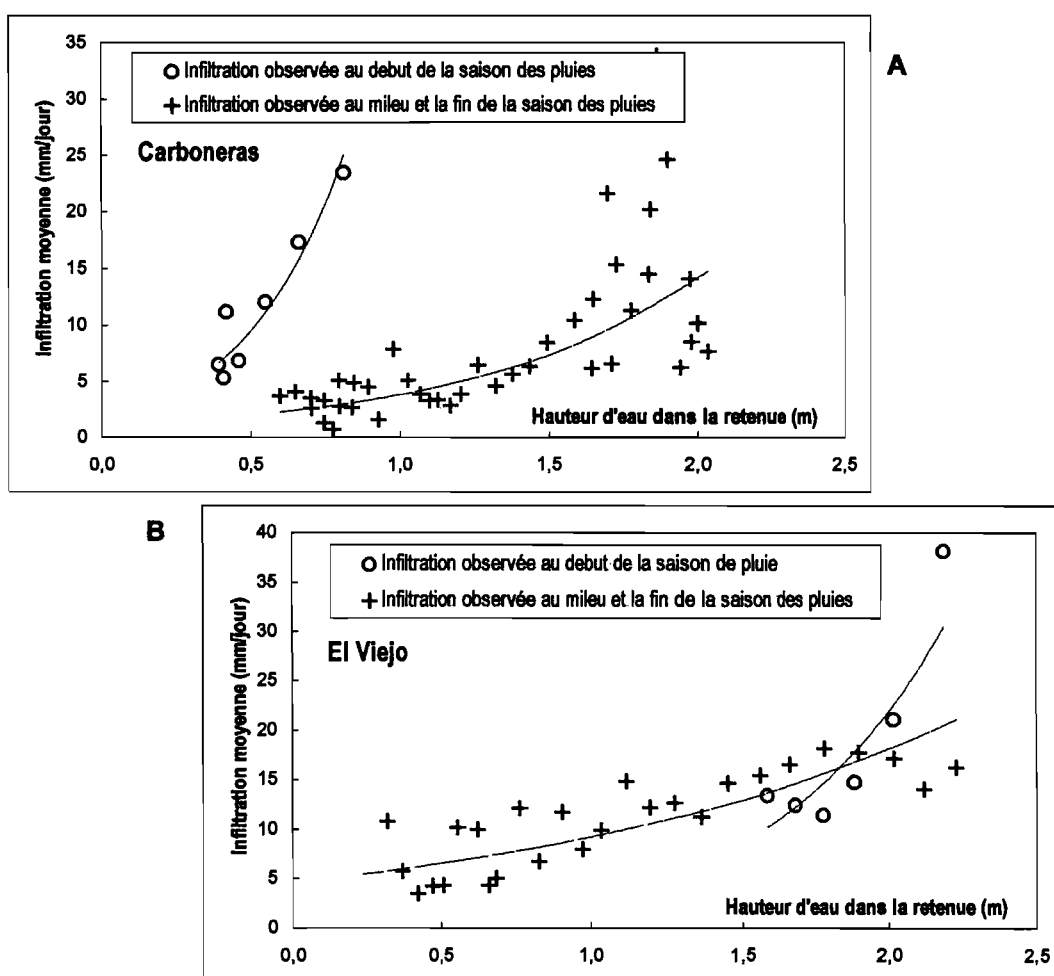


Figure 11.9. Infiltrations dans les retenues de Carboneras et El Viejo en fonction des hauteurs d'eau pendant la saison de pluies.

Analyse au niveau interannuel

Les mesures de perméabilité effectuées dans les fonds des cuvettes montrent clairement l'influence des sédiments sur les taux d'infiltration. L'analyse des écoulements sur parcelles (Cf. chapitre 7.1) a déjà montré que les premiers événements pluvieux de chaque saison des pluies sont ceux qui apportent le plus de sédiments aux retenues. Cette accumulation progressive de matériaux plus ou moins argileux au cours des années modifie les conditions qui déterminent les taux d'infiltration.

Pour les saisons des pluies des années 1996 et 1997, les taux d'infiltration ont été mesurés pour 4 des 7 retenues étudiées : celles de El Viejo, Carboneras, El Muerto et El Tullido. Par ailleurs, pour 3 d'entre elles, il a été possible de quantifier les volumes de sédiments apportés durant la saison des pluies de l'année 1996, permettant de comparer d'une année à l'autre leur effet sur l'infiltration de l'eau dans les *presones*.

La figure 11.10 présente les taux d'infiltration des retenues de Carboneras, El Tullido et El Muerto durant les années 1996 et 1997. Leur comparaison permet de montrer que l'infiltration n'a pas évolué de façon significative entre les deux saisons des pluies. En outre, les apports solides de l'année 1996 ont représenté un volume de 107 m³ dans la retenue Carboneras et 9 m³ dans celle de El Muerto. Ceux du *presón* El Tullido ont été évalués à 200 m³ pour les années 1996 et 1997. En prenant en compte une densité apparente moyenne de 1,85 g/cm³ (Cf. chapitre 7, paragraphe 7.2.2), ces volumes représentent un apport spécifique de 1,8 tonne/ha pour le bassin versant de Carboneras, 1,7 tonne/ha pour celui de El Muerto et 0,9 tonne/ha pour celui de El Tullido.

Dans le cas de la retenue de El Viejo, l'analyse des taux d'infiltration montre une différence significative à tous les niveaux entre les deux années d'observation (figure 11.11). Avec un volume de sédiments égal à 250 m³ pour l'année 1996, ce petit barrage est celui qui s'est le plus ensasé. Ce volume correspond à un apport spécifique de 2,5 t/ha pour le bassin versant. Les taux d'infiltration moyens mesurés dans cette retenue en 1996 sont supérieurs à ceux de 1997. A la cote de 1 m, par exemple, l'infiltration est de 8 mm/jour en 1996 et seulement de 4 mm/jour en 1997. Cette différence de comportement est due probablement aux processus de décantation et de compaction des sédiments dans la retenue.

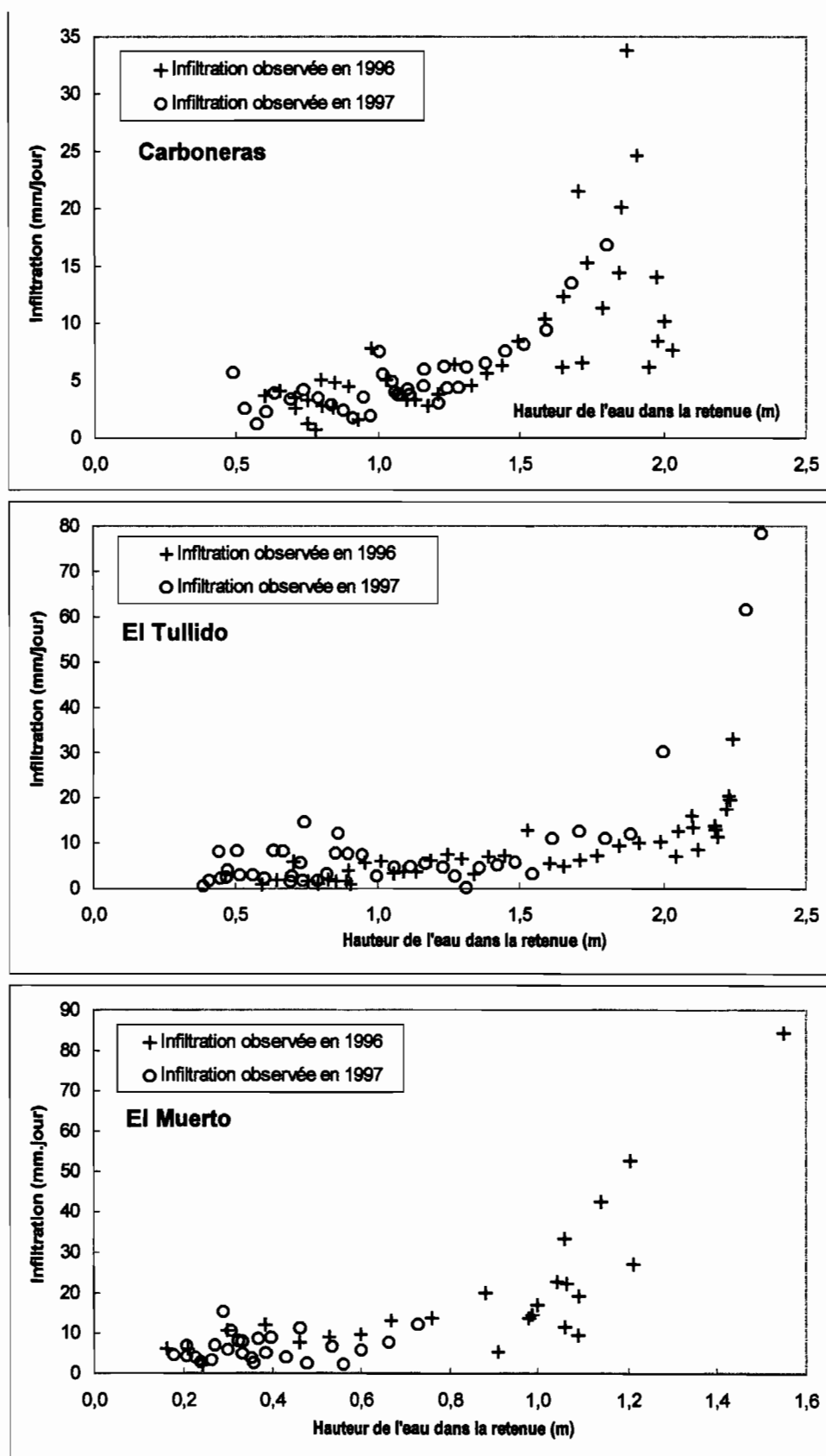


Figure 11.10. Infiltrations dans les retenues de Carboneras, El Tullido et El Muerto en fonction des hauteurs d'eau pendant les saisons sèches des années 1996 et 1997.

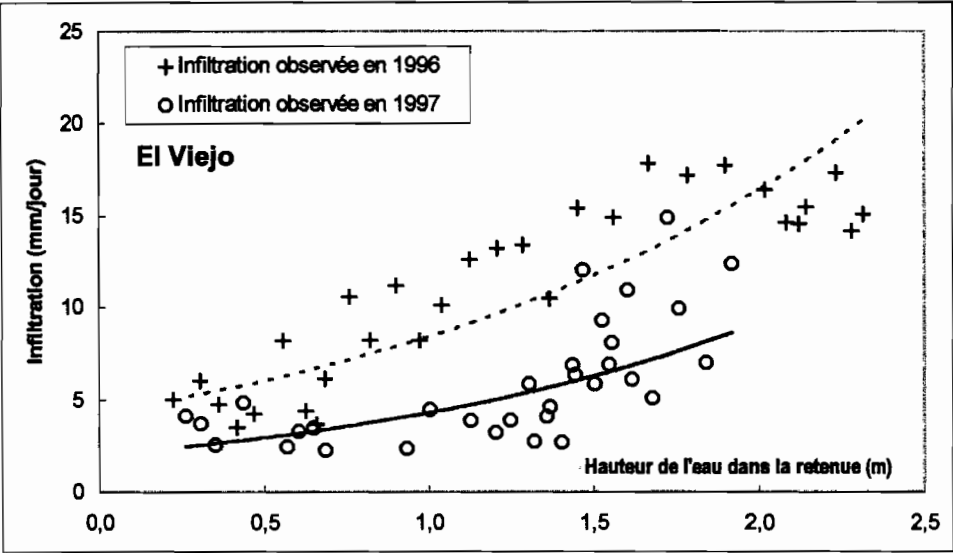


Figure 11.11. Infiltrations dans la retenue de El Viejo en fonction des hauteurs d'eau pendant les saisons sèches des années 1996 et 1997.

Caractérisation de l'infiltration entre les différentes retenues

La comparaison des taux d'infiltration entre les retenues permet d'établir une typologie des retenues étudiées. Pour les comparer, nous avons reporté sur la figure 11.12 les taux infiltrés des années 1996 et 1997 sur les *presones* Carboneras, El Muerto et El Tullido, 1997 pour celui de El Viejo et 1996 pour celui de Pastelero.

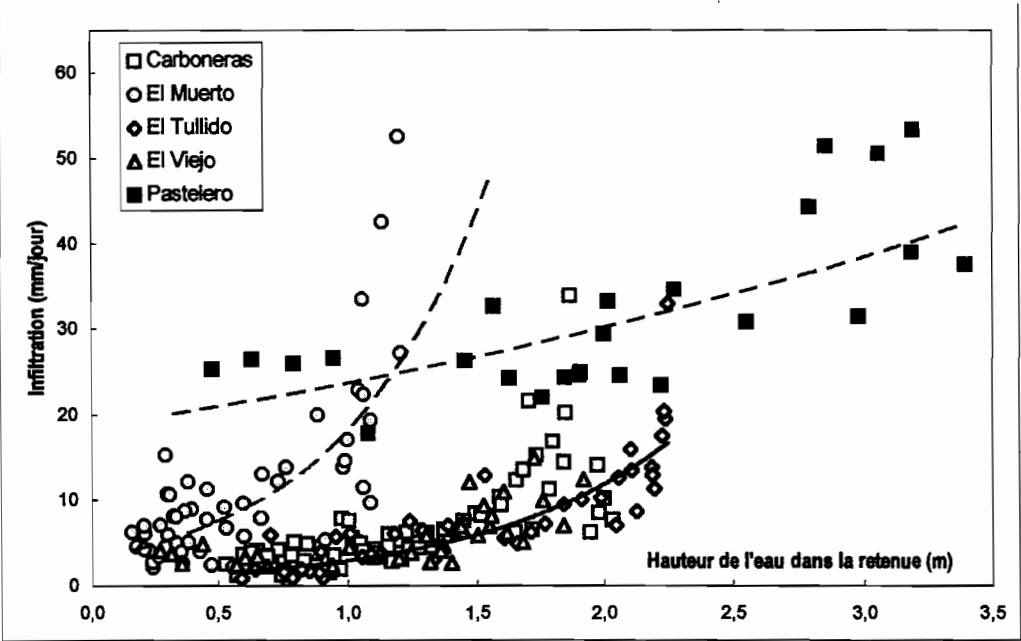


Figure 11.12. Comparaison des vitesses d'infiltration entre *presones*.

La figure 11.12 montre que les vitesses d'infiltration dans les cuvettes de Carboneras, El Viejo et El Tullido sont très semblables. Elles augmentent au fur et à mesure que s'accroissent le niveau d'eau en raison d'une part de l'accroissement de la surface mouillée qui se fait sur les bords de la retenue où la vitesse d'infiltration est maximale et d'autre part en raison de l'accroissement de la charge hydraulique sur le fond même de la cuvette. Bien que la relation entre la hauteur d'eau et l'infiltration ait un comportement exponentiel, il n'a pas été possible d'ajuster une fonction qui prenne correctement en compte les valeurs extrêmes de l'infiltration à des cotes supérieures à 2,0 mètres. La relation suivante permet néanmoins de prédire l'infiltration dans les retenues entre les cotes 0,5 et 2,0 m, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,61$:

$$I = 1,27 \text{ EXP } (1,14 H)$$

Où I représente le taux d'infiltration, exprimé en mm/jour,
 H étant la hauteur d'eau dans la retenue, exprimée en mètre.

Pour la retenue de El Muerto, la relation entre la hauteur d'eau et l'infiltration, pour des cotes comprises entre 0,2 et 1,6 m, est la suivante :

$$I = 3,13 \text{ EXP } (1,76 H) \quad R^2 = 0,65$$

Dans le cas du *presón* Pastelero, seules les données de 1996 sont exploitables car en 1997 les deux événements qui ont produit des écoulements ont provoqué de trop courtes périodes de stockage. Pour cette retenue, la relation exponentielle est de la forme :

$$I = 18,6 \text{ EXP } (0,242 H) \quad R^2 = 0,6$$

Les fortes vitesses d'infiltration dans la retenue de Pastelero s'expliquent par le curage récent de la cuvette. A la différence des autres cuvettes de rétention, celle de El Muerto est installée en position de haut glacis où les sols sont généralement de texture plus grossière (Viramontes *et al.* 1999), ce qui peut expliquer son comportement plus favorable à l'infiltration. Une mention particulière doit être faite pour celle de El Viejo car son comportement varie de 1996 à 1997 de telle sorte que le colmatage de la cuvette le rend analogue en 1997 à celui des autres cuvettes, celles de Carboneras et El Tullido.

11.4.3. L'infiltration dans les retenues et la recharge des aquifères

Avec un total de 61 retenues d'eau, la capacité de stockage du ranch est de l'ordre de 400 000 m³. Sans tenir compte des pertes au niveau de la distribution, ce volume est près de six fois supérieur aux besoins en eau du bétail, lesquels sont estimés à 70 000 m³. En évaluant les pertes par infiltration dans les retenues à 50% du volume stocké (200 000 m³), on peut considérer que ces pertes vont alimenter les ressources en eaux souterraines du ranch, contribuant à la réalimentation en eau des aquifères, principale source d'approvisionnement des abreuvoirs.

L'eau est distribuée sur tout le ranch par un réseau très étendu de réservoirs et d'abreuvoirs qui sont alimentés en effet par 67 forages équipés de pompes électriques, d'éoliennes ou de moteurs diesel. Chaque forage bénéficie d'une maintenance plus ou moins régulière, gérée par l'administration du ranch, (nettoyage, révision, réparation....) et en général chacune de ces interventions est mise à profit pour effectuer un relevé du niveau piézométrique de la nappe. Les données disponibles sur chacun des puits sont rassemblées sur l'annexe XII.2. Certains de ces puits sont situés à côté ou à proximité de petits barrages de rétention d'eau (Los Corrales, San Marcos, Sauz Mocho et Peñasco, cf. figure 11.1.). Les *presones* de Sauz Mocho et de San Marcos ont été construits à la fin du siècle précédent, alors que les forages mis en place à proximité ont commencé à fonctionner en 1929, ainsi que deux autres forages situés près des *presones* Los Corrales et Peñasco, mis en service respectivement en 1929 et 1925. L'évolution du niveau statique des nappes d'eaux souterraines pour les 4 forages est présentée sur la figure 11.13.

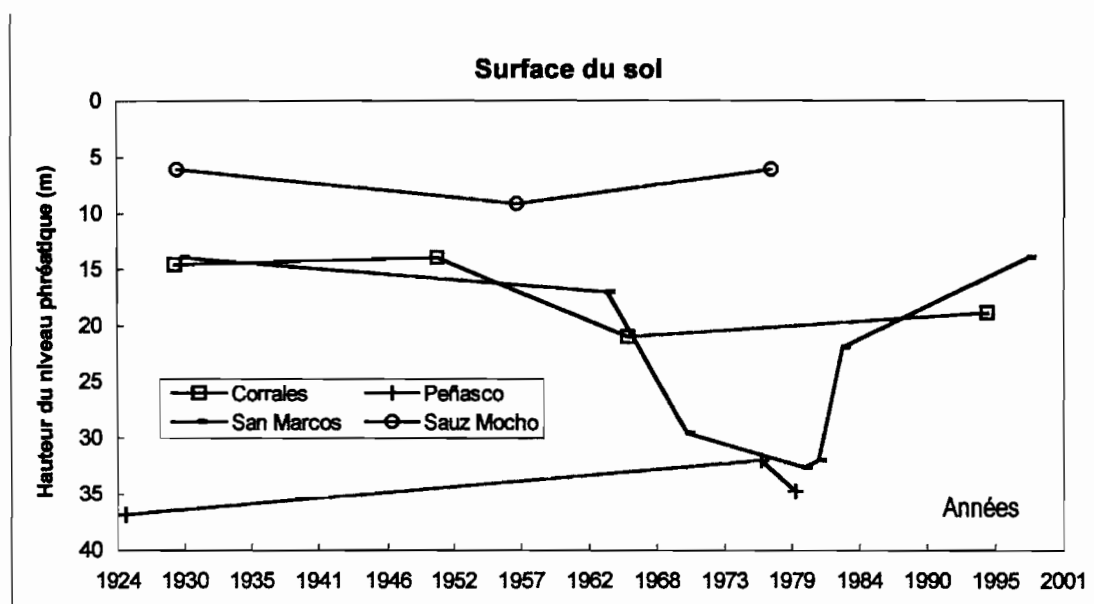


Figure 11.13. Evolution des niveaux piézométriques de 4 forages dans le ranch.

La faible variation des niveaux piézométriques de la plupart de ces puits et celle, assez chaotique, du forage San Marcos ne permettent pas de tirer de conclusions intéressantes à ce niveau. Une étude spécifique des aquifères serait nécessaire. On peut simplement constater que le niveau des aquifères s'est maintenu à peu près constant 70 ans.

11.5 Conclusion

L'analyse des bilans hydriques des retenues nous a permis d'éclaircir les mécanismes régissant leur fonctionnement mais provoquent un certain nombre de questions quant à leur utilité. L'eau stockée dans les retenues est peu utilisée pour abreuver le bétail (1,26 % sur les années 1996 et 1997). Les retenues sont rapidement asséchées et ne peuvent donc servir d'abreuvoir tout au long de l'année, un dispositif permanent d'alimentation en eau du bétail dans les enclos doit donc compléter l'aménagement des petits retenues.

Les *presones* se vident principalement par évaporation et infiltration avec une nette prépondérance pour cette dernière. La gestion et l'entretien des retenues influence les taux d'infiltration latérale et de profondeur. Ainsi, le fond du *presón* Pastelero, reconstruit en mars 1996, s'est retrouvé durant la saison des pluies suivante sans sédiments et directement en contact avec un substrat rhyolitique favorable aux infiltrations. Dans la retenue de El Viejo au contraire, qui n'a pas subi d'entretien depuis au moins 8 ans, la présence d'une épaisse couche de sédiments argileux limite les infiltrations profondes. Malgré cela, cette cuvette présente le même taux de décroissance du volume d'eau stocké que celui de Pastelero. Dans ce cas cependant c'est la géométrie de la retenue de El Viejo qui conditionne le rythme de décroissance de l'eau. En effet, sa plus importante superficie d'exposition à l'air et de contact avec le fond (figure 11.4), favorise autant l'infiltration que l'évaporation, de telle sorte que son taux de décroissance des volumes stockés est identique à celui du *presón* Pastelero (figure 11.7).

Nous avons proposé un indice de forme des retenues qui permet de les classer par rapport à une forme standard qui minimise les surfaces mouillées et les surfaces de miroirs par rapport au volume stocké. Cette forme correspond à un quart de sphère. Cet indice a le désavantage de ne tenir compte que de la forme de la retenue. Or, les mesures d'infiltration effectuées sur les *presones* montrent toute l'importance des sédiments pour le colmatage des retenues dans un contexte où le substrat est généralement assez filtrants : 20 à 40 mm/jour dans le *presón* Pastelero dont le curage a été réalisé au début de l'année 1996. Un curage de retenues peut donc être responsable de leur vidange rapide. Un nouvel indice, qui tienne compte des différentes valeurs de la vitesse d'infiltration dans les retenues et des surfaces sur lesquelles s'appliquent ces différentes vitesses, pourrait donc être proposé.

On voit également tout l'intérêt de l'analyse hydrologique des chapitres précédents pour proposer des lieux propices à la construction des retenues adaptant le capacités de stockage aux apports afin d'éviter les *presones* sans eau en année moyenne ou d'envisager la construction de nouveaux *presones* en aval de déversements importants.

Pour éclaircir le rôle joué actuellement par les retenues, il convient d'étudier le système de fourniture en eau mis en place sur le ranch Atotonilco.

CHAPITRE 12

LA GESTION DE L'EAU DANS LE RANCH ATOTONILCO

12.1. Un système de production orienté vers l'élevage extensif

12.1.1. Contexte historique

L'élevage semi-extensif est la seule activité développée dans le ranch depuis l'arrivée des premiers *conquistadores* dans la région au début du XVème siècle.

Selon les documents historiques disponibles, les premières explorations de la région ont été effectuées par l'espagnol Fray Géronimo de Mendoza, durant les premières années du XVème siècle (Corrales 1993). Après une rapide conquête de ces terres, la *Merced* fut donnée à Don Rodrigo del Río de la Loza par la couronne espagnole. Plus tard, en 1698, toute cette propriété fut achetée par le comte Antonio de Campa y Cos. Elle fut divisée en 1723 pour former pour la première fois l'Hacienda de Atotonilco de Avino. Onze ans après, en 1734, les terres furent achetées par Pedro Lorenzo de Cazal et Zuluaga qui changea le nom de la Hacienda par celui de « San Juan Bautista de Atotonilco ». L'hacienda appartient à la famille Cazal jusqu'en 1840, année au cours de laquelle elle fut annexée par l'église pour être ensuite vendue à Buenaventura Sarabia en 1888. A cette époque, l'hacienda était constituée de 27 troupeaux de gros bétail alimentés en eau par 10 points d'eau permanents et 4 temporaires s'asséchant en périodes d'étiage (Corrales 1993).

Outre l'hacienda Atotonilco, d'autres exploitations agricoles s'implantèrent dans la partie moyenne et semi-aride de la Région Hydrologique 36 au début de ce siècle, leur activité agricole étant déterminée par la disponibilité en eaux superficielles et en terres. Ainsi, celles qui étaient situées à proximité des principaux *rios* de la région (Nazas et Aguanaval), s'orientèrent vers la production cotonnière et d'autres spéculations agricoles, alors que celles qui ne disposaient pas de suffisamment d'eau s'orientaient préférentiellement vers l'élevage extensif.

Dans la région, la plupart des haciendas, après avoir été transformées en propriétés plus petites, ont maintenu le même type d'activité agricole. Cependant, sur les terres fragmentées pour être redistribuées aux *ejidatarios* l'usage du sol fut modifié. En effet, dans de nombreux cas, l'élevage extensif ne devenait plus rentable, obligeant les *ejidatarios* à développer d'autres activités en particulier des cultures vivrières.

¹ Propriété donnée par la Couronne espagnole aux conquérants

Deux types d'unités de production se sont donc progressivement établies dans la région : la propriété privée, avec des activités agro-pastorales généralement rentables, et l'*ejido*, qui, durant toute son existence, de 1917 à 1993, n'a pu intégrer l'économie de marché, se limitant à des activités de subsistance. Devant cette situation, en 1993, le gouvernement mexicain changea la législation de 1917 pour permettre aux *ejidatarios* de vendre leurs terres et de devenir propriétaires, ouvrant ainsi tout le secteur agricole à une économie de libre marché. Actuellement, bien que l'*ejido* ait légalement disparu, sa structure et son mode de gestion perdurent. On estime que le processus de reconversion prendra deux ou trois décennies.

12.1.2. Des conditions favorables à l'élevage

Les conditions climatiques et pédologiques qui dominent dans la partie moyenne semi-aride de la RH 36 permettent le développement de pâturages de bonne qualité ; selon Tarin (1993) ceux-ci représentent une superficie de 11 376 km² sur l'ensemble de la Région Hydrologique 36. Ceci a permis que certaines races bovines comme la race Herford, bien adaptée à ces conditions semi-arides, aient une production de viande de haute qualité (Anaya et Barral 1995).

Par ailleurs, la proximité de la frontière avec les Etats-Unis d'Amérique permet l'exportation de la plus grande partie du bétail vers ce grand marché de consommation. Ce système de production représente l'une des principales activités économiques du secteur agropastoral de la région (SAGAR 1996). Au Mexique, ce sont en effet les Etats du Nord du territoire (Durango, Coahuila et Chihuahua) qui exportent le plus de viande vers les Etats Unis.

12.2. Les pâturages comme facteur limitant principal

12.2.1. La production pastorale du ranch

La croissance de la végétation naturelle est favorisée par une série de facteurs qui limitent ou favorisent son développement. Le climat, le relief, la profondeur des sols et leurs capacités hydriques sont quelques unes des conditions qui influencent la distribution et la densité de la végétation naturelle (Anaya et Barral 1995).

Sur le ranch Atotonilco (Anaya 1998), se développent au moins 41 espèces de graminées (annexe XII.1). Parmi celles-ci, les principales plantes fourragères de bonne qualité sont : le pâturage *navajita* (*Bouteloua gracilis*) et autres espèces du genre *Bouteloua* (*curtipendula*, *chondrosioides*, *barbata* et *hirsuta*), les pâturages à *Andropogon perforatus* et *Sporobolus airoides*, ainsi que quelques espèces du genre *Mulhenbergia* comme *arizonica*, *monticola* et *wrightii* entre autres.

La plupart de ces pâturages sont constitués d'espèces annuelles dont la croissance dépend de la disponibilité en eau et dont le développement maximum est atteint durant les mois pluvieux de juin à octobre. La période critique pour le bétail, durant laquelle le développement végétal est minimum, se situe en fin de saison sèche, entre mars et mai. Les critères de gestion et d'administration du bétail dans le ranch sont basés sur ce cycle végétal. La vente des animaux est par exemple effectuée après

la période des pluies, entre novembre et janvier, lorsque les bêtes, profitant de l'abondance des pâturages, sont à leur poids maximum.

Selon COTECOCA (1968) et Pagot (1985), une vache de 400 kg consomme autour de 4380 kg de matière sèche par an sous des conditions similaires à celles du ranch Atotonilco. Par ailleurs, sur des pâturages naturels de graminées pérennes, on considère que le bétail consomme seulement 50 à 60 % de la production primaire (Cantu 1984), c'est à dire 50 % de la production végétale du ranch.

Une étude réalisée par Anaya et Barral (1995) dans le bassin versant de l'arroyo Saucillo (bassin versant de 3 200 ha intégré au réseau hydrographique du ranch dont il représente 7,1 % de la superficie) montre que les rendements annuels en matière sèche des pâturages oscillent entre 840 et 1430 kg/ha. Cette estimation a été faite au cours d'une année à précipitations pluviales légèrement inférieures à la moyenne annuelle.

En considérant seulement la moitié de la production de matière sèche utilisée par le bétail, on estime que la charge animale, que peuvent supporter ces pâturages, est d'une unité animale (UA) pour 7 ha. Cette superficie produit la nourriture nécessaire pour une vache de 400 kg pendant un an. C'est donc le faible rendement des pâturages naturels qui est le facteur limitant principal de l'élevage dans le ranch, autorisant seulement un élevage extensif avec une charge animale moyenne d'une UA pour 9 ha sur l'ensemble du ranch et interdisant l'implantation d'un système plus intensif sous ces conditions semi-arides.

12.2.2. La distribution spatiale du bétail pour mieux gérer les pâturages

Une définition optimale de la charge animale est indispensable pour la conservation de la ressource végétale. Dès 1922, le propriétaire du ranch, Raymond Bell, a pris en compte ce critère de gestion avec comme finalité de ne pas surcharger les pâturages, ce qui a impliqué la construction d'enclos permettant le meilleur contrôle possible de la charge animale par hectare et aussi d'assurer la rotation du bétail. Ceci a entraîné un fort investissement financier initial. Avec le temps, le nombre des enclos a progressivement augmenté et les principales voies d'accès se sont améliorées jusqu'à la distribution actuelle de ces structures dans l'Hacienda (figure 12.1).

Les 10 grands secteurs qui divisent les 450 km² de l'Hacienda sont divisés en un total de 102 enclos. Il existe en outre quatre grands embarcadères de bétail équipés correctement et reliés entre eux par deux grandes voies d'accès Nord-sud et Est-Ouest (figure 12.1). Ces voies d'accès permettent l'entrée des camions de transport qui effectuent les mouvements et le transport du bétail mis en vente. Deux ventes par an ont lieu sur le ranch : la première de novembre à décembre, généralement vers le marché des Etats-Unis, et la seconde de février à avril tant vers le marché Nord-américain que vers le marché national.

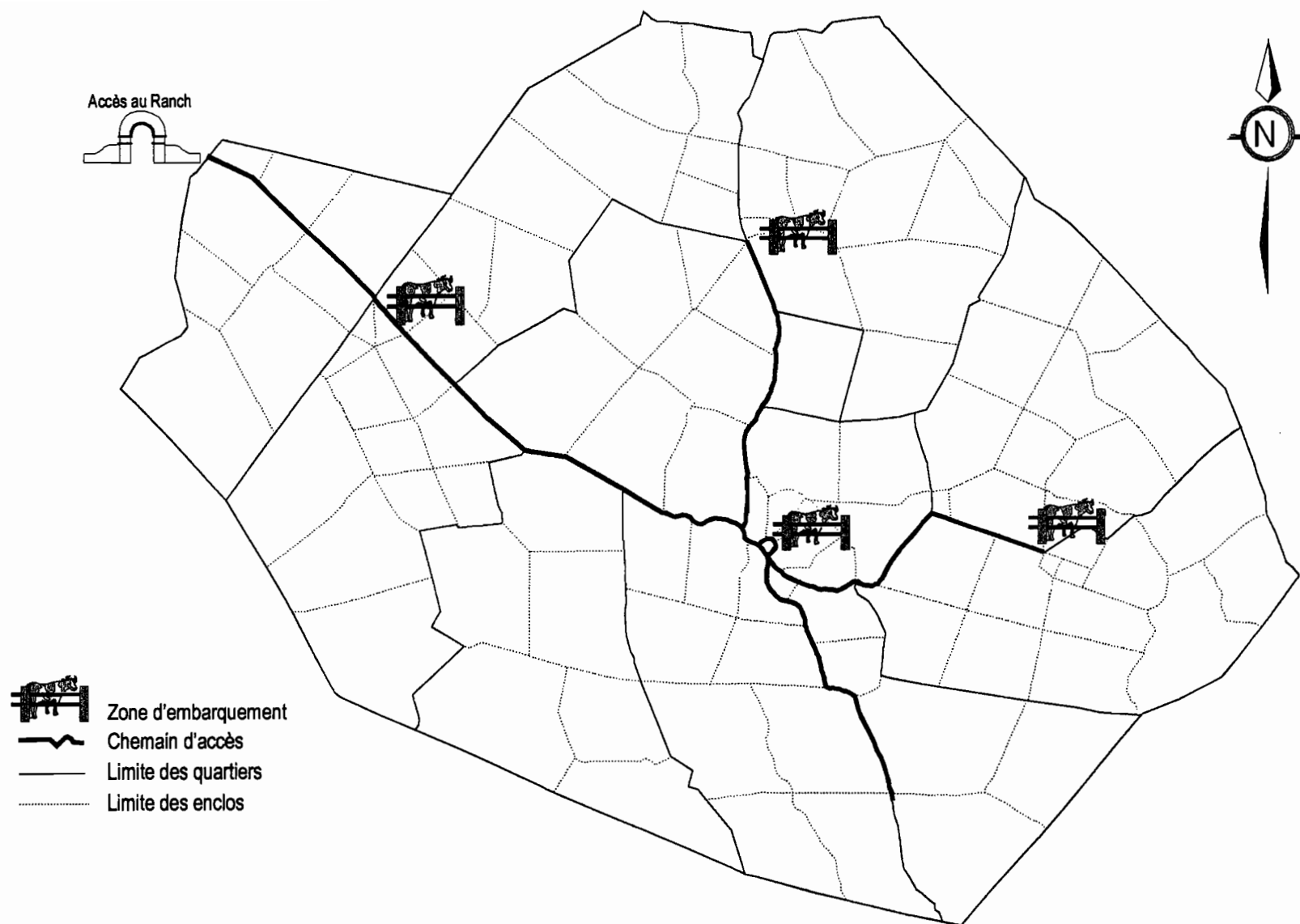


Figure 12.1. Infrastructures du ranch Atotonilco liées à la gestion des pâturages et à la vente du bétail.

Vers le marché des Etats-Unis sont exportés tous les veaux qui, après sevrage, atteignent un poids moyen de 180 kg. Les meilleurs spécimens sont conservés pour maintenir la lignée du ranch. Le bétail est trié par sexe : sur les femelles, on effectue l'ablation des ovaires, alors que les mâles sont castrés, ceci en accord avec les règles Nord-américaines d'importation du bétail.

Sur le marché national sont vendus tous les animaux de 10 ans d'âge, ainsi que toutes les vaches qui, pour des raisons diverses, n'ont pu être saillies. Des taureaux sont aussi vendus à des éleveurs de la région pour être utilisés comme géniteurs. La rotation du bétail par enclos se fait de la manière suivante :

- ◆ En début d'année, une fois terminée la première vente, une première rotation du bétail est effectuée dans les enclos en prenant en compte l'état du pâturage et la charge animale de l'année antérieure. Cette évaluation est basée sur l'expérience tant de l'administrateur de l'hacienda que des vachers qui peuvent, dans certains cas, avoir jusqu'à 50 ans d'ancienneté dans l'exploitation pastorale. Durant cette première étape de rotation, tous les taureaux sont concentrés par zone dans un même enclos en attente de la période de saillie. Les animaux à la vente sont regroupés dans des enclos proches des 4 grands embarcadères. Durant cette phase de concentration, la charge et la pression animale augmentent sur ces enclos. Néanmoins, pendant cette période assez courte, les animaux sont alimentés par des fourrages, évitant ainsi le surpâturage.
- ◆ Une deuxième rotation de bétail a lieu au cours du mois d'avril, cependant celle-ci s'effectue seulement pour quelques enclos. Elle a pour but de réinstaller les taureaux et les vaches pour la période de saillie. Cette répartition des animaux est ensuite maintenue constante jusqu'à la fin de l'année.

12.3. L'eau souterraine comme source principale d'abreuvement

La répartition spatiale du bétail dans les enclos oblige le ranch à couvrir les besoins en eau in situ. Ceci implique de prévoir des abreuvoirs dans chaque enclos afin d'éviter les grands déplacements du bétail qui se traduisent en perte de poids.

Dès le début de l'exploitation sous sa forme actuelle, en 1922, il était prévu que l'eau souterraine serait la source la plus sûre pour abreuver le bétail toute l'année, surtout durant les périodes de sécheresse, permettant ainsi à l'administration un usage optimal des pâturages grâce à des abreuvoirs à l'intérieur de chaque enclos.

Selon une étude de l'INEGI (1981) faite sur les caractéristiques physiques des roches et matériaux géologiques, 60 % de la superficie du ranch est constitué par des roches indurées et 40 % par des matériaux non consolidés. Une classification de ces matériaux géologiques consolidés ou non, vis à vis de leur aptitude à stocker de l'eau (INEGI 1989), propose trois types de potentialités, haute, moyenne et basse.

Sur les 60 % de roches indurées qui affleurent dans le ranch, la plus grande partie se situe dans la gamme des potentialités moyennes de stockage et une petite partie avec des potentialités faibles. L'unité à possibilités moyennes, localisée dans les parties centrale, est et ouest du ranch, est formée par des collines de toba rio-dacitique fortement fracturée. L'unité à faibles potentialités qui affleure au sud-ouest et à l'ouest du ranch est constituée d'un mélange de roches éruptives et sédimentaires très localement métamorphiques.

Quant aux matériaux non indurés, ils présentent tous de fortes potentialités de stockage. Ils sont distribués à l'ouest et sud-ouest du ranch, dans des vallées d'accumulations alluviales récentes.

Afin de connaître la profondeur de l'eau des aquifères et en utilisant les données de 25 forages, une carte des isobathes a été effectuée sur toute la superficie du ranch (figure 12.2). Les forages sélectionnés ont maintenu leurs niveaux statiques constants, sans changements significatifs depuis leur perforation (plus de 40 ans pour la plupart).

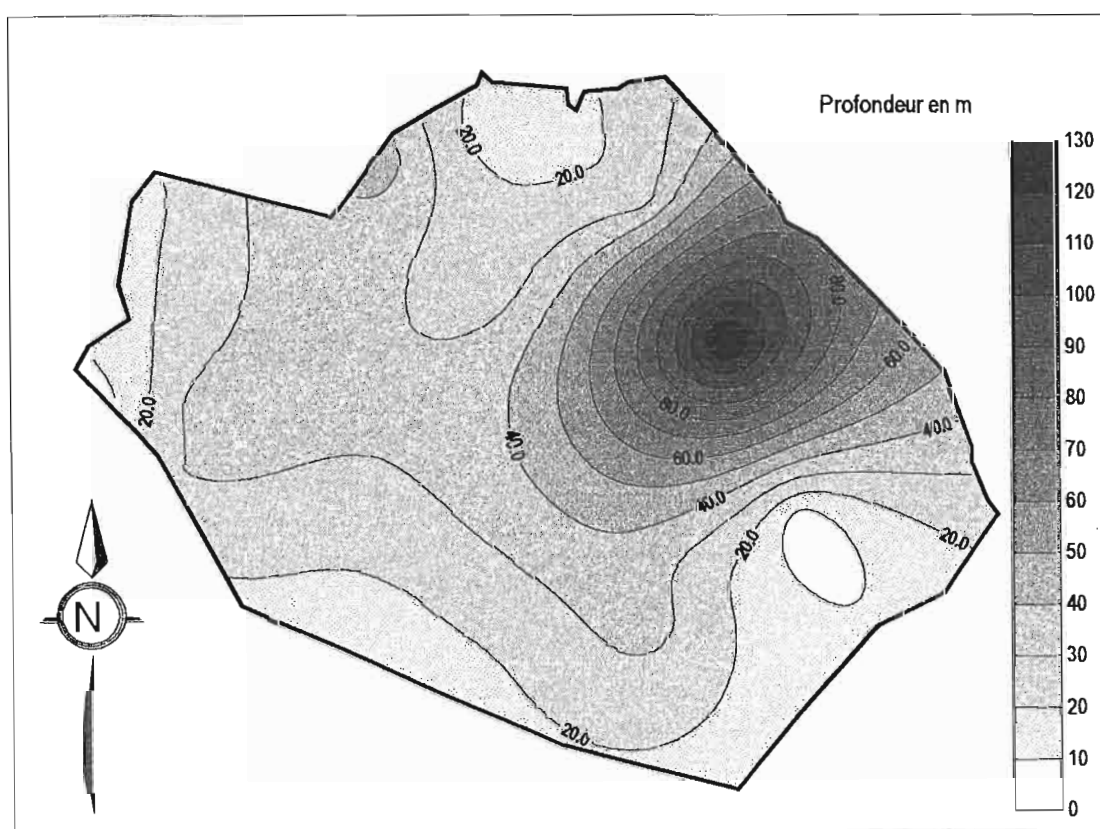


Figure 12.2. Profondeur des aquifères dans le ranch à partir des données de 25 forages.

Les lignes d'isobathes dans le ranch montrent que les profondeurs du niveau statique varient entre 7 et 190 mètres. Sur la plus grande partie du ranch, cette profondeur est inférieure à 40 m, alors que vers le sud et le nord-est on relève les profondeurs de niveau les plus importantes.

12.4. Les instruments techniques de gestion de l'eau souterraine

12.4.1. Les puits

Le niveau statique des aquifères s'approfondit du sud-ouest au nord-est du ranch et détermine la profondeur de perforation des forages. Ceux situés dans la partie centrale, ouest, sud et nord-ouest du ranch ont des profondeurs inférieures à 40 mètres, tandis que ceux situés vers la partie nord-est ont des profondeurs supérieures à 100 mètres (figure 12.2). Sur les 69 puits recensés dans le ranch, 34 ont des profondeurs inférieures à 80 mètres et 21 seulement dépassent les 100 mètres (annexe XII.2).

Dans un souci d'économie, les puits sont entubés seulement jusqu'à la profondeur à laquelle se trouve localisée la pompe. Ceci provoque, avec le temps, des éboulements de parois dans certains puits non revêtus creusés dans des matériaux géologiques tendres et des diminutions progressives des débits d'extraction qui nécessitent des travaux de nettoyage. Les administrateurs du ranch préfèrent réaliser très occasionnellement ce type de travaux plutôt que de procéder à un revêtement de parois et la majorité des puits n'ont pas été nettoyés depuis les 30 dernières années. Ces travaux, lorsqu'ils sont effectués, sont néanmoins mis à profit pour approfondir les puits et améliorer les débits d'extraction.

Par ailleurs, l'équipement des puits est aussi un motif de révision et d'entretien. Les problèmes les plus courants sont liés à la pompe (changement des joints du piston) et au système de transmission (rupture de la barre de transmission).

Tant les travaux de désembourbage que d'approfondissement, de révision ou de réparation, sont réalisés sous contrats avec des sociétés spécialisées. Ces diverses interventions sont effectuées en moins de deux semaines et selon un coût qui peut varier entre 12 000 et 20 000 FF. Une simple révision ou réparation classique au niveau de l'équipement d'un puits ne dépasse pas les 3 000 FF.

Les pompes qui équipent la presque totalité des puits, à l'exception de ceux à moteurs électriques, sont de type alternatif de déplacement positif (*émbolo*). D'un fonctionnement simple et bien connu, elles sont utilisées pour des situations qui requièrent de faibles débits et de grandes profondeurs d'extraction. Ce système simple de pompage permet de réduire les coûts tant d'investissement que d'entretien, ces derniers, bien que réalisés par des sociétés de maintenance, étant relativement faibles comparés à ceux d'autres types de pompes. La réalisation de certaines pièces, dans les propres ateliers du ranch, diminue en outre sensiblement le coût des réparations.

Les moteurs utilisés pour le fonctionnement de la pompe sont soit éoliens, soit diesel, soit encore électriques :

- ◆ Les moteurs éoliens transforment l'énergie du vent en mouvement rotatoire par un système simple d'hélices ; celui-ci est ensuite transformé en mouvement rectiligne qui déplace la barre d'attache du piston de la pompe. Les hélices sont montées sur une structure métallique de 5 mètres de haut. Bien que nécessitant un entretien minime, ce type de

moteur peut présenter des problèmes liés à la barre de transmission (rupture ou usure des jonctions sont les plus communes). Les puits équipés uniquement avec ce type de moteur sont capables d'alimenter un réservoir et un maximum de trois abreuvoirs.

- ♦ Les moteurs diesel ont généralement un système de courroies qui transforme le mouvement rotatoire du moteur en déplacement rectiligne. Ces moteurs nécessitent un entretien plus important en relation tant avec le moteur lui-même (carburant, huile, démarreur...), qu'avec le système de transmission (rupture des courroies, graissage des engrenages...). Les forages équipés de ces moteurs alimentent généralement des systèmes de distribution plus importants. Ces moteurs distribuent l'eau à des réseaux formés par plusieurs réservoirs et plus de 10 abreuvoirs. C'est le cas du forage Los Corrales qui alimente trois réservoirs et 17 abreuvoirs, ou du forage San Antonio qui distribue l'eau à un réservoir et 18 abreuvoirs. En général ces puits fonctionnent 24 heures sur 24, du lundi matin au samedi midi durant la saison sèche, de manière moins intensive en période de pluies.
- ♦ Certains forages sont équipés des deux systèmes, éolien et diesel, ceci afin de remplir une double fonction : garantir la distribution de l'eau au bétail et favoriser une économie d'énergie en présence de vents ou lorsque la demande est minime. C'est généralement durant les mois de février et mars, époque de vents forts dans la région, que ce système permet de réaliser une économie de combustible tout en assurant l'alimentation en eau du réseau.
- ♦ Il existe en outre dans le ranch deux forages équipés d'un moteur électrique. Le principal forage fournit de l'eau potable aux installations du périmètre de l'hacienda et alimente un réseau de 9 abreuvoirs et 2 *tarjeas* (petits réservoirs d'eau) situées à proximité. Ces abreuvoirs fournissent l'eau nécessaire au bétail en stabulation dans l'enceinte de l'hacienda pour des raisons diverses (vente, traitement vétérinaire...). Le second forage, appelé Doña Beatriz, situé au Sud du ranch, reçoit de l'énergie électrique à partir d'un générateur à moteur diesel. Il distribue de l'eau à l'un des réseaux les plus importants du ranch constitué par 4 réservoirs et 22 abreuvoirs.

La perforation, l'équipement et la gestion des forages ont évolué au cours des 80 années d'exploitation du ranch. C'est à partir de 1922, sous la propriété de Raymond Bell, qu'ont été perforés les premiers forages, pour arriver à un total de 28 en 1930 (annexe XII.2). Avec le temps, ce nombre est allé en s'accroissant afin d'obtenir une meilleure distribution de l'eau dans l'ensemble du ranch, pour atteindre un total de 41 en 1950, uniquement équipés de moteurs éoliens. C'est à partir de 1963, lorsque la propriété fut acquise par la Compagnie d'élevage Atotonilco, que la plupart de ces forages furent équipés de moteurs diesel en même temps que d'autres furent creusés. Dès 1970, 60 des 69 forages actuels étaient perforés, ce qui correspondait à une densité de un forage pour 7,5 km². Actuellement, sur le total des 69 forages du ranch, 26 sont équipés d'un moteur éolien, 38 d'un moteur diesel, 2 d'un moteur électrique et 3 autres sont hors de fonctionnement (figure 12.3).

12.4.2. Les réservoirs de stockage (*pilas* et abreuvoirs)

Depuis la perforation des premiers forages dans le ranch jusqu'à l'installation des abreuvoirs dans chacun des enclos, le système de distribution de l'eau a été peu à peu complété et amélioré. Deux étapes peuvent être distinguées : la première, sous l'administration de Raymond Bell du début des années 1920 jusqu'aux années 50, a vu l'installation de la majorité des forages et des réservoirs existant dans le ranch, et la seconde, depuis les années 60 et jusqu'à nos jours sous l'administration de la « Compañia Ganadera Atotonilco », a vu la mise en service d'un grand nombre d'abreuvoirs afin de réduire au maximum le distances de parcours.

Première étape : implantation des forages et des réservoirs

Les réservoirs (70 au total) construits en ciment, avaient comme double fonction : stocker l'eau des forages et servir d'abreuvoirs. La plupart sont de forme circulaire; leur diamètre varie entre 5 et 20 mètres et leur hauteur entre 1,3 à 1,6 m. Tous ces réservoirs sont construits sur le même modèle : un socle circulaire de pierres cimentées et lissées de 0,4 m d'épaisseur et d'un diamètre de 2 m supérieur au réservoir lui-même, délimite un petit canal entourant la structure et servant d'abreuvoir au bétail. L'eau passe directement du réservoir vers le canal, son niveau étant réglé par un simple flotteur. Quelques réservoirs (5 au total), sont de forme carrée et leurs dimensions vont de 3 à 6 m de large pour 1,5 à 2,5 m de haut. Durant cette première étape, 8 abreuvoirs circulaires en ciment (5 à 6,2 m de diamètre et 0,4 m de haut, avec une capacité de 9,8 m³) ont également été construits et de petits abreuvoirs appelés *tarjeas* ont été installés à la convergence de quatre enclos. Au nombre de 12 sur le ranch, ils sont alimentés à partir d'un réservoir.

La capacité de stockage de chacun des 75 réservoirs varie entre 31,4 et 775 m³, avec un stockage moyen de 176,9 m³ et une capacité totale de 13 091 m³.

Le coût actuel estimé pour la construction d'un réservoir de moyenne capacité oscille entre 9 000 et 11 000 FF.

L'entretien de ces structures est minime. Il est seulement nécessaire de les nettoyer deux ou trois fois par an afin d'éviter la formation d'algues. Les réservoirs sont blanchis à la chaux une fois par an et leurs alentours dégagés de la végétation tous les trois ou quatre ans. Ces réservoirs sont très peu détériorés avec le temps, et seul le système des flotteurs pose parfois des problèmes qui nécessitent au moins une intervention par an.

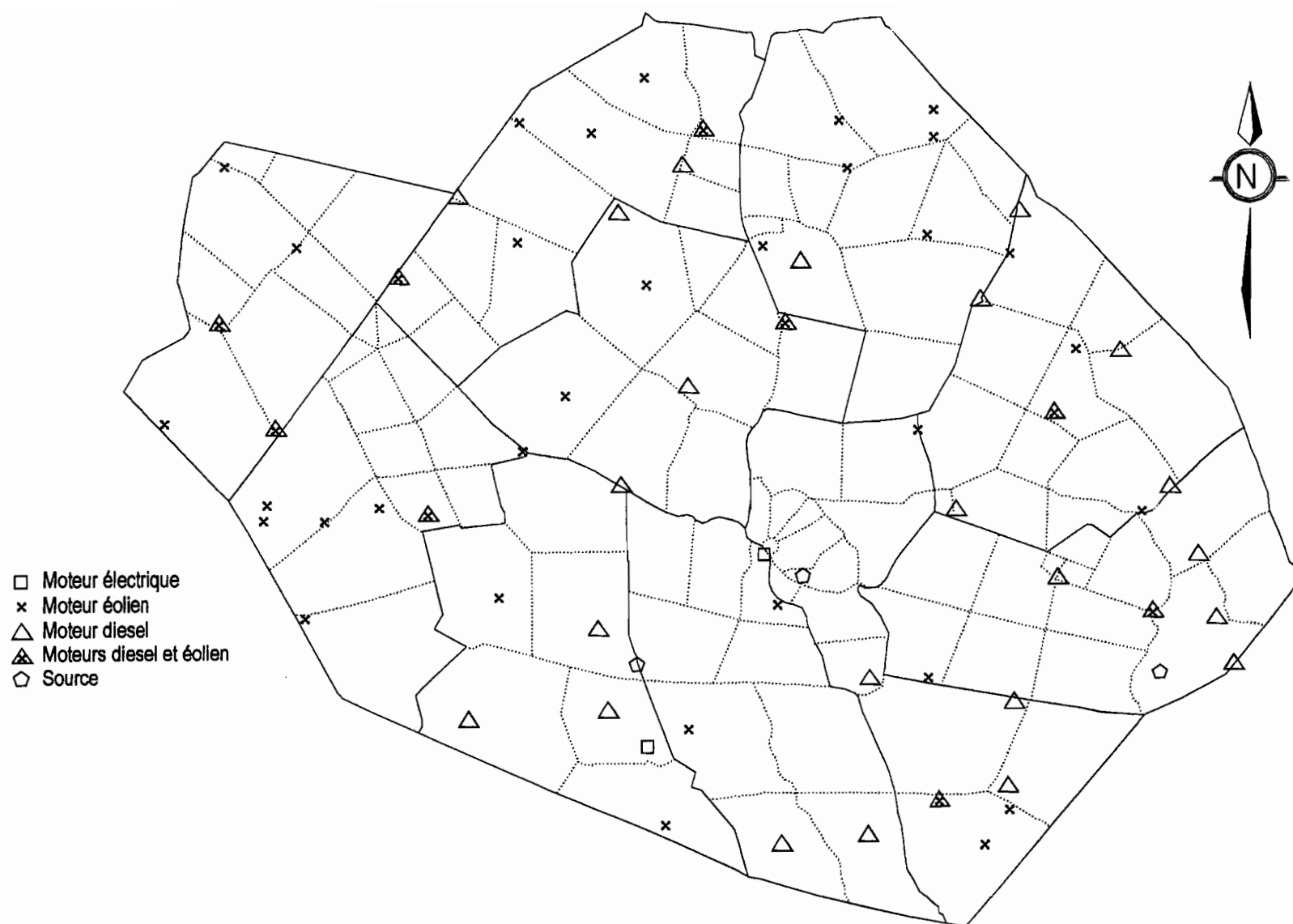


Figure 12.3. Localisation des sources, des puits et des équipements d'exhaure.

Seconde étape : mise en place des abreuvoirs

La « Compagnie Atotonilco » a considérablement amélioré le système de distribution de l'eau sur l'ensemble du ranch grâce à l'installation, entre les années 1960 et 70, de 278 abreuvoirs et 15 réservoirs supplémentaires.

A la différence des structures antérieures, ces 15 nouveaux réservoirs ont été construits en tôles de ½ pouce d'épaisseur, assemblées par des vis et un joint de caoutchouc. Les réservoirs circulaires, qui ont un diamètre compris entre 7,4 et 20 m et une hauteur moyenne de 1,42 m, sont ancrés sur un socle de pierres cimentées de 40 cm d'épaisseur. Leur capacité varie entre 60 et 470 m³, ce qui donne une capacité de stockage moyenne de 306 m³ et une capacité totale de 3986 m³. A la différence des réservoirs en ciment, ils ne servent pas à l'abreuvement, mais seulement au stockage de l'eau avant sa redistribution. Une estimation du prix de revient actualisé de ce type de réservoir oscille entre 12 000 et 14 000 FF.

Les abreuvoirs proprement dits sont de forme circulaire et construits en tôle sur le même principe que les réservoirs. Leur diamètre nettement plus réduit, varie entre 2,2 et 9,2 m. pour une hauteur de 0,4 à 0,8 m. Ils sont posés sur une base de pierres cimentées de 40 cm d'épaisseur. Une valvule située à leur partie inférieure permet de réguler leur niveau d'eau grâce à un simple flotteur. Leur capacité de stockage varie entre 3 et 36 m³, avec une moyenne de 12,2 m³ et une capacité totale de 3388 m³. Ces abreuvoirs, installés pour augmenter l'efficacité de la distribution de l'eau, représentent un certain investissement économique. Une estimation du prix actualisé pour la construction d'un abreuvoir de 5,6 m de diamètre et de 0,50 m de hauteur oscille entre 2 500 et 3 500 FF.

L'entretien des réservoirs et des abreuvoirs en tôle est minimal. Il consiste seulement à leur appliquer une peinture anti-oxydante tous les 5 ou 6 ans, à les nettoyer régulièrement pour éviter la formation des algues et à réparer au moins une fois par an le système de régulation des niveaux des réservoirs.

La figure 12.4 représente la répartition actuelle de tous les réservoirs et abreuvoirs existants dans le ranch Atotonilco.

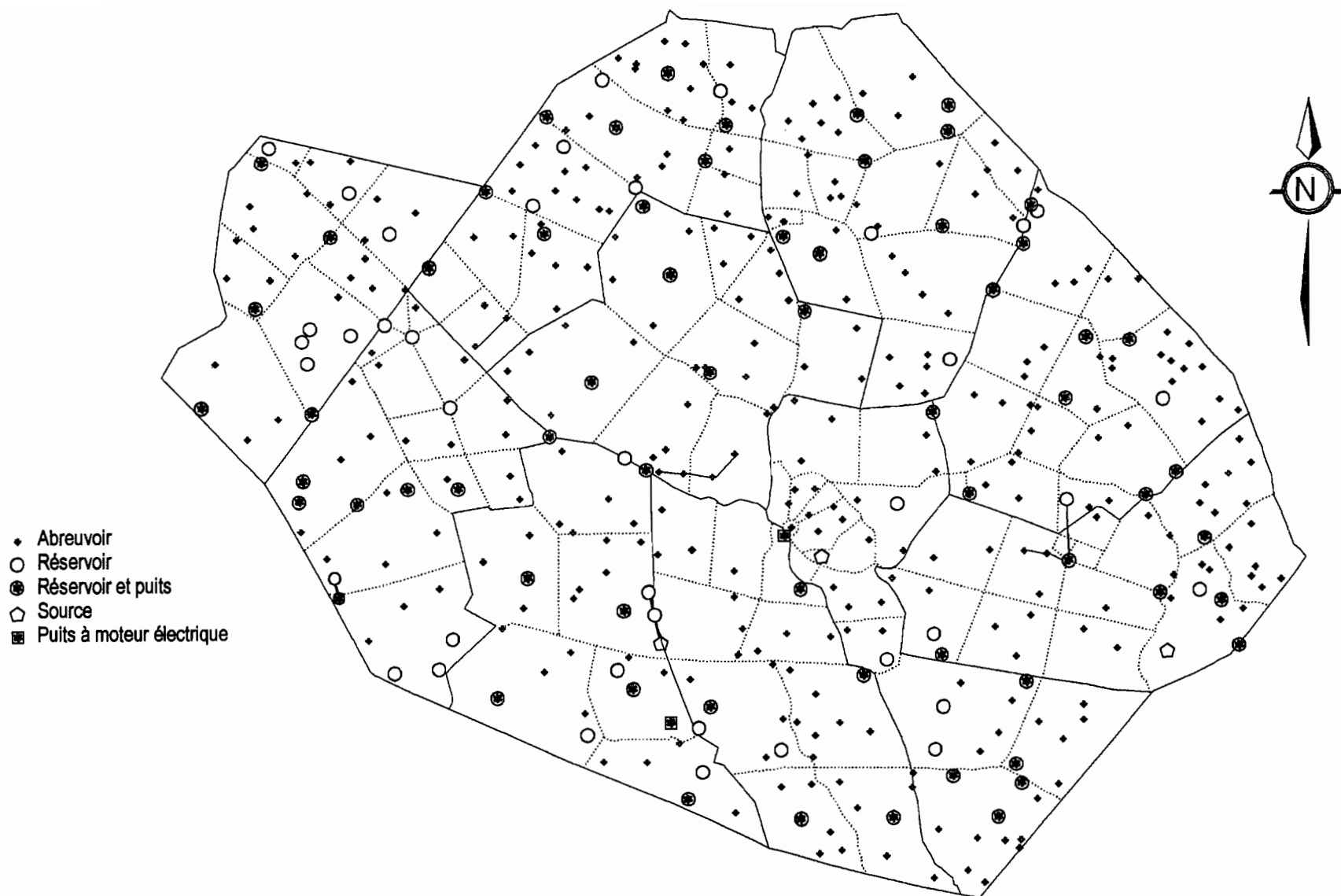


Figure. 12.4. Distribution des réservoirs et abreuvoirs dans le ranch Atotonilco.

12.4.3. Connexion entre forages, réservoirs et abreuvoirs

L'installation du réseau des 278 abreuvoirs a été effectuée à la fin des années 60 suivant un plan de distribution de l'eau réalisé par quatre ingénieurs. Ce plan a nécessité des investissements financiers et humains importants. L'objectif était d'alimenter tous les abreuvoirs par gravité en profitant de la situation topographique élevée des réservoirs. L'ensemble des systèmes implantés, qui forment le réseau de distribution (forages, réservoirs, abreuvoirs, *presones* et connexions), sont présentés sur la figure 12.5. Les noms des éléments du système d'alimentation en eau sont placés dans l'annexe XII.3.

La connexion des divers éléments de ce nouveau réseau de distribution fut réalisée par des tuyaux en plastique de 1 ¼ à 1 ½ pouce de diamètre, enterrés à 10 cm de profondeur et raccordés au système flotteur de chaque abreuvoir qui en contrôle l'entrée d'eau. Une estimation, au prix actuel, du prix de revient et de la mise en place de 1 000 m de tuyau (distance moyenne entre deux abreuvoirs), de 1 ½ pouce de diamètre et de forte épaisseur, oscille entre 7 000 et 8 000 FF.

Selon les enquêtes effectuées et les vérifications de terrain opérées, ce système de distribution qui fonctionnait de façon correcte à ses débuts, a rencontré diverses difficultés de fonctionnement au cours du temps. La principale de ces difficultés est la rupture des tuyaux du réseau, qui nécessite des inspections et des révisions permanentes de la part du personnel du ranch. Une des causes de ces ruptures est en partie due au vieillissement du matériau plastique qui est en service depuis au moins 25 ans, mais aussi au fait que les vaches le déterrent très régulièrement pour le mastiquer. Des bouchons se forment également à l'intérieur de ces tuyaux enterrés, par développement et accumulation de racines au niveau des jonctions.

12.4.4. Utilisation des sources

La zone d'étude comprend quatre sources principales : deux d'entre elles servent strictement à approvisionner le réseau d'abreuvoirs. Les deux autres, qui justifient l'implantation de l'ancienne *hacienda*, sont utilisées tant pour l'abreuvement du bétail qu'à des fins récréatives.

- ♦ La source Carboneras (Annexe XII.3) alimente directement un réseau de 17 abreuvoirs et de 2 réservoirs. Cependant, il est impossible d'avoir recours à cette source toute l'année car son alimentation dépend de la saison des pluies : elle peut assurer certaines années humides un approvisionnement en eau durant les six mois qui suivent la saison des pluies.
- ♦ La source Moctezuma, située au sud du ranch, alimente trois abreuvoirs. A la différence de celle de Carboneras, elle fournit de l'eau toute l'année mais avec un faible débit.
- ♦ L'eau provenant de la source Zapata est stockée directement dans une retenue servant d'abreuvoir pour le cheptel bovin de race charolaise. Cette source est située à 200 mètres de l'*hacienda* et une fois la traite effectuée, ces animaux n'ont pas de grands déplacements à effectuer pour aller s'abreuver. Dans la retenue ont été introduits des poissons, permettant ainsi aux ouvriers journaliers et aux propriétaires de pêcher.

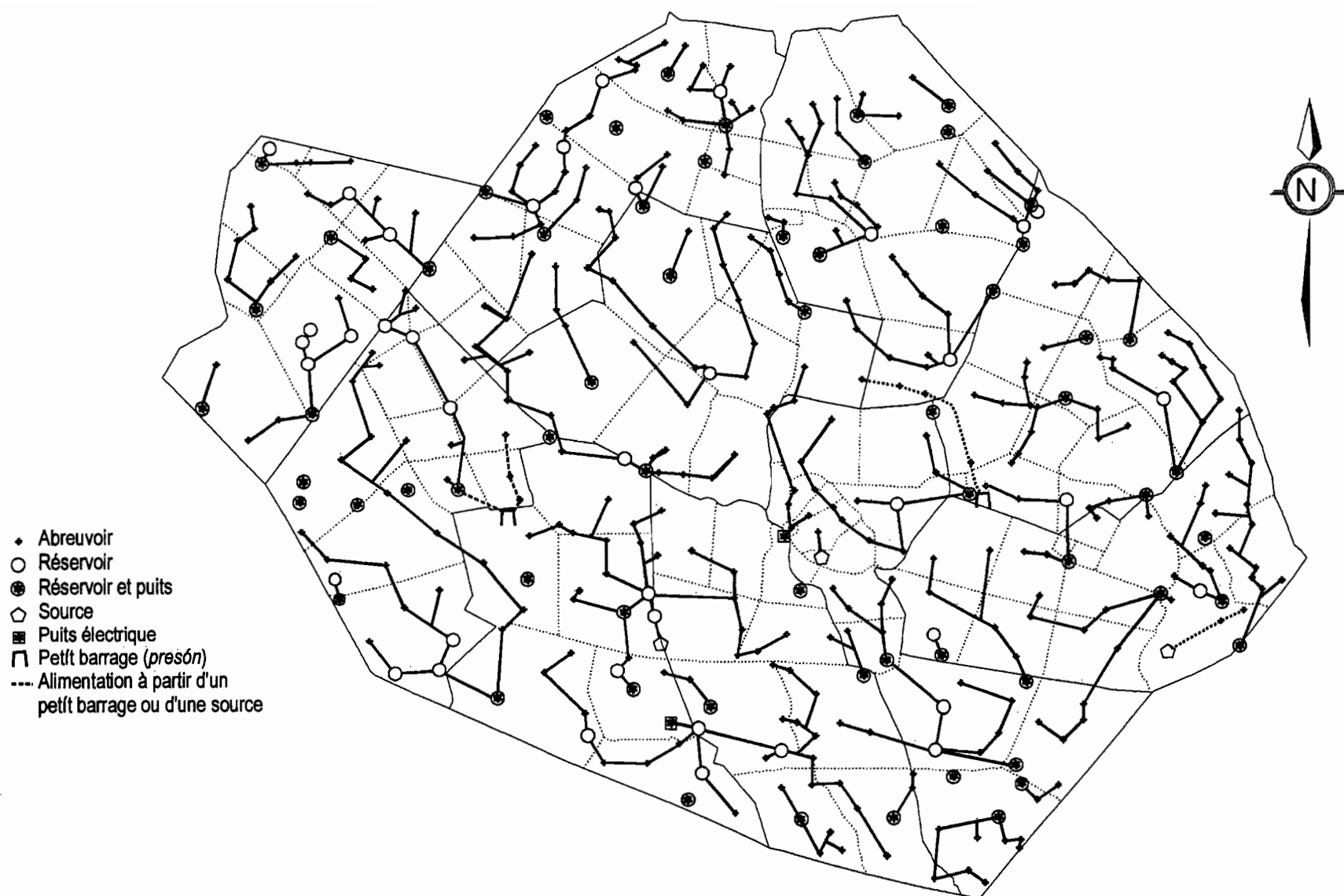


Figure. 12.5. Réseau de distribution de l'eau dans le ranch Atotonilco.

- ♦ La quatrième source, appelée «*ojo de agua*», a été, lors de la création de l'hacienda, sa principale source d'approvisionnement en eau potable. Située à un kilomètre des bâtiments de l'ancienne *hacienda*, l'eau de cette source est amenée par conduction jusqu'à un grand bassin installé au coeur même de l'hacienda, et qui est utilisé par les propriétaires et les ouvriers agricoles pour leur divertissement. Il sert aussi de niche écologique à diverses espèces d'oiseaux. A partir du bassin, l'eau peut également être pompée et transportée vers des abreuvoirs situés plus en amont et destinés prioritairement au bétail en stabulation.

12.4.5. Utilisation des eaux superficielles

Capacité de stockage des retenues

Dans la zone d'étude, dès le XIX^{ème} siècle, les eaux superficielles ont été exploitées à partir de petits barrages (*presón* San Marcos et Sauz Mocho) qui ont toujours été uniquement destinées à l'abreuvement du bétail. Cependant, bien que la construction des premières digues ait débuté en 1922, ce n'est qu'en 1963, sous l'administration des propriétaires actuels, qu'est privilégié ce type d'ouvrages. Ainsi, le nombre de *presones* est passé de 20 en 1963 à 50 actuellement.

La figure 11.1 montre la distribution spatiale des toutes les retenues dans le ranch. Dans certains cas, ces retenues ont été installées en fonction des voies d'accès. En effet, la construction récente de grandes pistes d'accès a permis la construction d'une série de retenues adossées à leurs talus (au total 13, dont 1 en construction), et à l'intersection des principaux *arroyos* drainant la zone.

La capacité de stockage des digues de rétention varie considérablement, de 480 à plus de 56 000 m³. Leurs capacité moyenne est de 8 800 m³, avec une capacité totale de stockage d'un peu plus de 440 000 m³. Les dimensions des cuvettes sont très variables : leur longueur va de 30 à 290 m et leur profondeur moyenne de 0,4 à 5 m. Les principales caractéristiques des retenues sont présentées dans l'annexe X.2.1.

Utilisation des retenues dans le réseau d'abreuvement

Le principal objectif des retenues d'eau est, selon les administrateurs du ranch eux-mêmes, l'abreuvement direct du bétail. Ils ont néanmoins essayé, ne serait-ce qu'à petite échelle, d'autres types d'aménagements en dérivant l'eau de certains *presones* vers le réseau de distribution. Ainsi, dans deux des principales retenues, San Marcos et Sauz Mocho ayant une capacité respective de 34 800 m³ et 56 250 m³ (figure 11.1), ont été installées des prises qui conduisent l'eau vers le réseau d'abreuvoirs à l'aide d'un système simple de conduction. Ce système pose cependant certains problèmes de fonctionnement, dont le principal serait l'envasement des prises d'eau, ce qui décourage la pratique courante de ce mode d'approvisionnement en eau des abreuvoirs. Néanmoins, ces installations précaires de dérivation peuvent alimenter entre deux et quatre abreuvoirs entre les mois de septembre et décembre, période pendant laquelle le *presón* contient suffisamment d'eau.

La plupart des retenues contiennent de l'eau du moins de septembre au moins de janvier, ce qui limite leur utilisation à cette seule période. Cependant, quelques-unes, de plus grande capacité ou installées sur des matériaux imperméables, peuvent rester en eau plus longtemps. Cette courte durée d'utilisation de l'eau des retenues est un inconvénient majeur de ce système d'abreuvement qui apparaît être seulement une alternative à l'utilisation de l'eau souterraine, laquelle reste prioritaire pour l'abreuvement régulier du bétail.

Construction et aménagement des retenues

Selon le propriétaire du ranch, la construction de digues a pour objectif principal l'abreuvement direct du bétail et la recherche d'une moindre dépense en ce qui concerne la consommation en diesel des pompes à moteur. L'établissement de ces petites retenues répond à divers critères, basés principalement sur l'expérience et sur les pratiques exercées sur cette zone par les éleveurs. La décision de la construction d'une retenue est basée à la fois sur des connaissances empiriques et des critères d'utilité : estimation des écoulements superficiels produits par le ruisseau sur lequel elles sont construites, faisabilité du point de vue topographique, facilités d'accès et possibilités d'utilisation par le bétail. C'est ainsi qu'ont été construites des digues dans des zones à faible ruissellement et forte infiltration, telles les zones basaltiques et à conglomérats : digues de Oso Negro et de El Molino. Après ces expériences malheureuses, l'installation des retenues d'eau sur ce type de matériaux a cessé.

D'une façon générale, l'aménagement des petits barrages est assuré directement par l'administrateur de la propriété, en collaboration avec les responsables des zones où ils sont installés. Leur gestion doit tenir compte de deux facteurs essentiels : leur entretien (curage de la cuvette en cas d'envasement trop important, reconstruction de la digue en cas de démolition) et la distribution de l'eau dans le réseau des abreuvoirs.

Bien qu'il n'existe pas de données précises concernant l'entretien des cuvettes de rétention, on peut estimer qu'elles sont nettoyées au moins une fois tous les 10 ans. Cependant, cette opération dépend de plusieurs critères : l'estimation à vue d'oeil de la somme des travaux à réaliser, la disponibilité en main d'oeuvre et en équipements liée aux autres activités de l'exploitation (réparation des voies d'accès, etc.), et les priorités données par l'administrateur. Il faut signaler que durant les premières années qui suivent le nettoyage, l'infiltration augmente de façon importante par suite de l'élimination des dépôts fins sédimentés, généralement argileux (Cf. chapitre 11). Le nettoyage d'une retenue de 15 000 à 20 000 m³ nécessite généralement 10 jours de travail à l'aide d'un bulldozer. Trois engins sont disponibles dans le ranch : deux de 600 chevaux et un de 200, consommant au total entre 3 500 et 4 000 litres de diesel pour un nettoyage. Cette opération comprend le grattage et l'élimination des sédiments, mais aussi le remodelage de la digue, le refaçonnement des berges, et le dégagement du terrain situé à proximité.

12.4.6. Stratégie de gestion de l'eau

L'entretien adéquat du réseau de distribution (figure 12.5) requiert beaucoup de travail et surtout une connaissance empirique de la solution à divers problèmes qui surviennent en permanence. Ainsi, les *manguereros* (ouvriers chargés de la maintenance des réservoirs, des abreuvoirs et du réseau de connexion) travaillent à temps complet et toute l'année. Six équipes de deux personnes sont chargées de ce travail. Chacune d'elles est affectée à un secteur du ranch. Ce personnel travaille en général 8 heures par jour du lundi au vendredi et quatre heures le samedi.

Les travaux des personnels responsables peuvent être hiérarchisés de la manière suivante : fonctionnement des forages, remplissage des réservoirs et abreuvoirs et vérification du réseau de conduction d'eau. Chacun de ces travaux requiert une certaine stratégie de la part du personnel. Les connaissances acquises au cours de plusieurs années de pratique leur permettent d'optimiser tant la ressource que le fonctionnement de l'ensemble du système de distribution.

Chaque équipe est en moyenne responsable du fonctionnement de 11 forages équipés soit d'un moteur diesel, soit éolien, ou les deux. Le remplissage d'un réservoir de 200 m³ de capacité, avec un débit de 20 l/mn, requiert par exemple un pompage ininterrompu d'un peu moins de 7 jours. Ceci nécessite une surveillance continue du fonctionnement de chaque ensemble ou système réservoir-abreuvoir, de façon à éviter tout débordement. Des personnels auxiliaires sont affectés jour et nuit à la surveillance des dispositifs (besoins en huile et carburant, temps de fonctionnement, remplissage...) en particulier au niveau des forages principaux et durant les périodes critiques de l'année comme la saison sèche.

Lorsque le forage est équipé d'un système mixte de pompage, (moteur diesel et éolien), l'un ou l'autre est utilisé selon la force du vent ou les nécessités en eau du moment. Dans le cas des moteurs éoliens, le système d'extraction se déconnecte manuellement quand le réservoir est rempli d'eau. Les vents qui permettent le fonctionnement des hélices se présentent généralement au cours de l'après-midi, mais, durant la saison sèche (février à mai), ils sont plus fréquents et plus forts, permettant aux hélices d'être efficaces durant des périodes plus longues.

La figure 12.3 montre que les puits à moteur éolien ne peuvent alimenter qu'un maximum de trois abreuvoirs en raison de la faible capacité d'extraction de ce type de moteurs.

12.5. Conclusion

Le système de production d'élevage mis en place par le ranch Atotonilco est assez représentatif des moyennes et grandes exploitations du Nord-Mexique. Le pâturage est le facteur limitant principal de l'élevage dans cette région, ce qui amène les exploitants à diviser leurs propriétés pour avoir un charge animale à l'hectare bien répartie, adaptée aux différentes zones. Ceci entraîne inévitablement une distribution de l'eau très dispersée dans l'espace. Le ranch Atotonilco s'est peu à peu adapté à ces contraintes en construisant une série d'ouvrages de prise, de stockage et de distribution, basée principalement sur l'exploitation des eaux souterraines. Ces ouvrages se sont multipliés au cours du siècle et ont évolué au fur et à mesure des avancées technologiques.

Les *presones* sont actuellement les derniers maillons d'une série d'aménagements superposés, mais, contrairement à la logique de développement précédente, ils sont très peu intégrés à l'infrastructure de distribution existante, malgré la volonté des administrateurs du ranch. Il faut se rappeler que sur 2 années d'observations de 5 retenues, seuls 726 m³ d'eau ont été utilisés pour l'abreuvement, ce qui ne représente que 1,3 % des volumes stockés et 0,4 % des besoins en eau du bétail.

Il semble que l'expérience actuelle accumulée par les gestionnaires du ranch se soit faite principalement sur l'exploitation des eaux souterraines et que les quelques échecs rencontrés lors de la construction des retenues ou de leur exploitation soient facilement surmontables. Nous consacrerons donc le dernier chapitre de cette thèse à simuler quelques modifications qui permettraient un usage plus intensif des l'eau stockée dans les retenues.

CHAPITRE 13

PERSPECTIVES D'UTILISATION DES PETITS BARRAGES

13.1. Rappels des diagnostics et définition des objectifs de gestion

13.1.1. Estimation des bilans au niveau du ranch

La capacité totale de stockage potentiel des *presones* du ranch est de 460 000 m³ (annexe XIII.1). Si, parmi ceux-ci, on élimine ceux situés sur les zones de faible écoulement (basalte et conglomérats), on peut estimer que la capacité réelle du ranch oscille autour de 430 000 m³. En considérant que la majorité de ces retenues ont eu des stockages significatifs en 1996, de l'ordre de 80 % de leur capacité en prenant compte les résultats des 7 cuvettes étudiées, nous avons estimé que le stockage a représenté cette année là 344 000 m³ d'eau sur l'ensemble du ranch. Il faut rappeler que sur les 7 retenues observées en 1996, 2 ont eu des déversements significatifs. En 1997, ce stockage a fortement diminué, atteignant à peine 20 % de la capacité totale des retenues, soit un stockage estimé à 86 000 m³ d'eau pour l'ensemble du ranch.

Sous les conditions de gestion de l'eau des *presones*, c'est à dire avec un abreuvement du bétail le plus souvent direct et sans dérivation ou pompage dans les retenues, des taux d'infiltration de l'ordre de 50 % du volume stocké (chapitre 11), on peut estimer que le volume infiltré à partir des retenues a été de 172 000 m³ en 1996, de 43 000 m³ en 1997. Or nous avons vu au chapitre 10 que l'année 1996 pouvait être considérée comme hydrauliquement légèrement supérieure à la valeur médiane pour la plupart des bassins observés. Par contre, l'année 1997 doit être considérée comme exceptionnellement sèche en ce qui concerne les écoulements puisque sa période de retour est évaluée à plus de 20 ans pour les trois bassins versants pour lesquels nous avons réalisé une reconstitution des lames ruisselées.

Par ailleurs, selon les informations recueillies sur le terrain, le volume d'extraction annuel d'eau souterraine oscille entre 90 000 et 110 000 m³, répartie uniformément sur l'année ce qui revient à des demandes de 8300 m³/mois et de 280 m³/jour. Sachant qu'il n'existe pas de compteurs volumétriques dans les forages, ces chiffres ont été déterminés à partir de la capacité de stockage des abreuvoirs en considérant que ceux-ci sont remplis partiellement (7 m³ sur une capacité de 12) une fois par semaine. Les pertes dues aux ruptures le long du réseau de conduction dans les divers réservoirs et abreuvoirs n'ont pu être estimées mais la demande en eau totale du bétail est de 67 000 m³ et l'évaporation de 11 200 m³, on peut donc considérer un taux d'efficience du réseau de distribution, hors évaporation, d'environ 33 %.

13.1.2. Les objectifs de gestion et les échelles de raisonnement

En terme de gestion, l'évaporation sera considérée comme une perte ainsi que les déversements. Dans le cas du ranch, il n'y a pas, a priori, de débits réservés à l'aval pour des problèmes environnementaux. Les écoulements sont sporadiques et rapides, ils coulent dans des lits bien définis et n'ont que peu d'effet sur la production des pâturages.

Par contre, l'infiltration pose problème car du point de vue strictement économique, il y a bien une aberration à favoriser l'infiltration de l'eau pour ensuite la pomper à des coûts supérieurs. D'un point de vue environnemental, on peut cependant considérer que l'infiltration des retenues contribue à maintenir les niveaux piézométriques et considérer les *presones* avant tout comme des ouvrages de recharge. Encore faut-il démontrer que les volumes infiltrés alimentent bien les aquifères.

Sur la base des données disponibles, il est possible d'analyser l'évolution des niveaux phréatiques sur deux périodes d'observation : 1920 - 1980 et 1971 - 1980.

L'analyse globale de 19 forages sur la première période met en évidence une légère baisse du niveau moyen d'à peine 5 mètres en 60 ans (0,125 m/an) avec pour certains puits une augmentation des niveaux phréatiques. Pourtant, durant ce laps de temps, la gestion de l'eau du ranch a beaucoup évolué, passant d'une extraction purement éolienne à une exploitation plus intensive avec moteurs diesel. Cependant, la construction de nombreuses retenues a probablement compensé dans bien des cas les prélèvements en eaux souterraines dus à cette augmentation de l'exhaure. En effet, une analyse plus fine de 11 forages sur la seconde période ne permet pas de mettre en évidence une baisse sensible du niveau phréatique (figure 13.1). Durant cette période, 6 des 11 puits montrent une légère diminution de niveau statique, 3 une augmentation et 2 sont restés stables. En résumé, on ne voit pas l'effet du mode de gestion (extraction, recharge) sur le niveau des nappes, peut-être en raison des volumes restreints mis en jeu pour l'alimentation en eau du bétail.

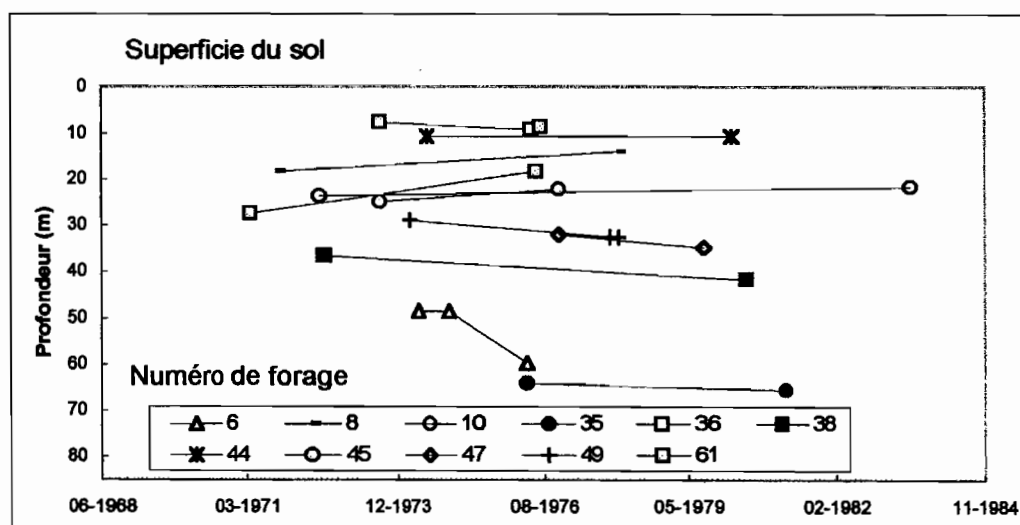


Figure 13.1. Evolution des niveaux phréatiques sur la période 1971-1980.

Cependant, si l'on considère le bassin versant, il convient de rappeler qu'immédiatement en aval du ranch, se trouvent un certain nombre de petites et moyennes propriétés exploitées par des *ejidatarios* qui produisent des cultures vivrières et maraîchères irriguées. La distribution de l'eau se fait majoritairement en gravitaire par des canaux à ciel ouvert à partir d'un réservoir de stockage. Ces derniers sont alimentés par des sources permanentes qui proviennent de la vidange des nappes souterraines situées sous le ranch. On peut craindre qu'une légère baisse des niveaux piézométriques entraîne une diminution du débit de ces sources voire un assèchement sur de courtes périodes, ce qui serait préjudiciable à la viabilité de ces exploitations. En l'absence d'étude hydrogéologique précise, les volumes infiltrés par les retenues seront donc considérés comme une participation à la recharge des nappes.

13.1.3. Orientations de gestion et indicateurs de performance

Les bilans et les analyses réalisés dans les chapitres précédents indiquent clairement (chapitre 11) un faible taux d'utilisation de l'eau des retenues (1 à 2 %), une évaporation de l'ordre de 40 % et une infiltration comprise entre 58 et 59 %. Les démarches à entreprendre pour rationaliser l'utilisation des *presones* dans le ranch d'Atotonilco concerne donc la connexion des *presones* au réseau de distribution d'eau, la diminution de l'évaporation et de l'infiltration. Avant d'entreprendre quelques essais de simulation pour illustrer les solutions qui pourraient être proposées améliorer la gestion d'eau des *presones*, il convient de définir quelques indicateurs pour quantifier les performances individuelles de chaque retenue et le fonctionnement global des ouvrages au niveau du ranch.

♦ Indices caractérisant les retenues

Nous avons vu au chapitre 11 qu'en année légèrement supérieure à la normale, 2 retenues sur 7 n'avaient pas reçu d'écoulements significatifs alors que 3 autres avaient des débordements importants pouvant atteindre 72% des écoulements. Les analyses hydrologiques menées au cours de ce travail permettent à l'avenir d'éviter de tels désagréments. Elle peuvent servir en effet à localiser les nouveaux ouvrages et à définir leurs caractéristiques car l'expérience empirique des administrateurs n'y peut suffir.

D'une manière générale, l'adéquation des capacités de stockage de réservoirs se raisonne en fonction d'objectifs déterminés par les gestionnaires du ranch et en fonction des apports superficiels. Dans le cas présent, les séries chronologiques observées sont trop courtes pour envisager une analyse statistique de la série observée mais l'extrapolation effectuée au chapitre 10 sur trois bassins versants (Carboneras, El Muerto et Pastelero) a montré que les apports de l'année 1996 étaient légèrement supérieurs aux valeurs médianes. Elle peut donc être considérée comme proche de la médiane et utilisée comme année de référence.

Pour les retenues existantes, l'adéquation entre la retenue et son bassin versant consiste à éviter le surdimensionnement de la retenue relativement aux apports de son bassin versant. Deux indices peuvent être utilisés dans ce but : un indice de stockage (IST) et un indice de remplissage (IRE).

$$\text{IST} = (\text{volumes écoulés} - \text{volumes déversés}) / \text{volumes écoulés}$$

$$\text{IRE} = \text{volume maximum stocké} / \text{capacité de stockage}$$

Il existe dans la littérature des indices de dimensionnement plus fins qui tiennent compte de l'évolution des défaillances en fonction des dimensions de la retenue (Gould B. W. 1961). Ce type de critères convient pour un ouvrage isolé et nécessite une simulation lourde. D'autres enfin prennent en compte le coût économique des surdimensionnements en comparant le volume de terre de la digue à la capacité de stockage. Dans le cas du ranch, les digues sont construites très sommairement par un seul engin, sans beaucoup de main d'œuvre additionnelle et le coût du surdimensionnement n'est donc pas excessif.

Le premier critère indique l'importance du déversement au cours de l'année. Plus le déversement est important, plus l'indice s'éloigne de la valeur 1 et s'approche de la valeur 0. Le second critère renseigne sur la plus ou moins grande capacité de la retenue à stocker le ruissellement. La valeur 1 de l'indice IRE correspond à un niveau maximum annuel proche de la cote de déversement. Plus le maximum annuel s'éloigne de la cote du déversoir, plus l'indice diminue et s'approche de 0.

♦ Indices de valorisation des retenues

L'abreuvement du bétail est la seule utilisation programmée des réservoirs, c'est donc le volume utilisé pour l'abreuvement (V_u) que nous allons prendre en considération pour le comparer d'une part aux volumes stockés dans les retenues et d'autre part aux besoins en eau du bétail. Le premier indice est un critère d'allocation (IA), simple rapport entre les volumes utilisés et les volumes stockés :

$$\text{IA} = \text{volumes utilisés} / \text{volumes stockés}$$

Si cet indice nous donne une indication de la fonction du barrage, il ne permet pas d'apprécier les défaillances de fourniture en eau au bétail que la retenue est sensée alimenter. De manière générale, les défaillances s'analysent en fonction de leurs Intensités, de leurs Durées et de leurs Fréquences (analyse I.D.F.). Nous considérerons comme défaillance, toute période de temps pendant laquelle la retenue ne peut fournir la totalité des besoins réclamés par le bétail qu'elle est sensée desservir, directement ou par son réseau de distribution. En effet, les animaux ont besoin d'eau de manière uniforme toute l'année, une seule défaillance de fourniture suppose d'avoir accès à une autre source d'alimentation. Dans le cas du ranch Atotonilco, il est cependant exclu de satisfaire toute la demande du bétail par un stockage des eaux superficielles et l'utilisation des eaux souterraines permet d'assurer l'essentiel de la fourniture. Il reste néanmoins intéressant de se doter d'indices nous permettant d'évaluer l'efficacité des retenues quant à la satisfaction d'eau du bétail. En effet, lorsque nous allons simuler différentes connexions avec le réseau de distribution, le nombre de têtes de bétail desservi ne sera plus le même pour une retenue. Afin de tenir compte des modifications d'usages des *presones* nous proposons les indices suivants :

IB = besoins du bétail desservi / besoins des animaux du ranch

IS = volumes fournis / besoins du bétail desservi

Le premier indice définit la fonction assignée au *presón* et le second le service rendu par la retenue relativement à la tâche qui lui a été assignée. Pour une retenue donnée, la demande en eau est égale à la consommation en eau prévue du bétail approvisionné par cette retenue et le réseau de distribution qui lui est connecté. L'indice IS, calculable mois par mois si nécessaire est utile pour illustrer l'amélioration des performances d'une retenue lorsque l'on modifie ses caractéristiques intrinsèques (capacité de stockage, formes etc...), il devient erroné lorsque l'on simule des connexions entre cette retenue et un réseau de distribution car dans ce cas le nombre de têtes de bétail change et les volumes demandés également. Pour compléter ce critère de satisfaction, nous introduirons un nouvel indice de satisfaction des besoins en multipliant les deux indices IB et IS :

IST = IB IS = volumes fournis / besoin global du ranch

La demande en eau du bétail est uniforme durant toute l'année, généralement faible par rapport aux volumes stockés et la durée de défaillance sera prise en compte dans l'indice simplifié suivant :

DS = durée de l'eau dans la retenue / durée de la période

Dans le cas du ranch Atotonilco, il est impossible d'examiner les fréquences d'apparition de défaillances puisqu'il existe seulement 2 années d'observation, la première représentant une année en fonctionnement normal, la deuxième de fréquence vicésimale sèche servant d'exemple pour estimer les risques des solutions proposées. De même, au cours d'une année, le nombre d'apparitions d'une défaillance n'ayant que peu d'intérêt, nous ne définirons donc pas d'indice de fréquence.

♦ Indices d'impacts sur la recharge des aquifères

Nous avons décidé de considérer l'infiltration des retenues comme élément composante de la recharge des nappes d'eaux souterraines (paragraphe 13.1.2). Nous proposons donc un premier indice (II), rapport des volumes infiltrés aux volumes stockés :

II = Volume infiltré / volume stocké

Cependant, pour analyser complètement l'effet d'une retenue sur le bilan d'eau de la nappe, il est également nécessaire de tenir compte des extractions opérées dans la retenue pour alimenter le bétail. On peut considérer en effet que le volume utilisé pour alimenter en eau le bétail n'a pas à être pompé dans la nappe. C'est donc en quelque sorte un volume supplémentaire non prélevé

dans les nappes souterraines qui contribue positivement à leurs bilan. Soit un *presón* donné pour lequel nous avons au niveau annuel un volume utilisé V_{uo} , un volume infiltré V_{io} , la demande en eau globale du ranch étant D . En modifiant les caractéristiques de la retenue ou son fonctionnement, les termes d'utilisation et d'infiltration deviennent V_{u1} et V_{i1} : on suppose, car c'est le but recherché, que $V_{u1} > V_{uo}$. Dans la situation initiale, la recharge nette de la nappe correspond au volume infiltré diminué du volume extrait, égal aux besoins globaux du ranch moins le volume extrait, soit : $R_o = V_{io} - (D - V_{uo})$. La variation de recharge nette obtenue par modification sera donc :

$$\Delta R = R_1 - R_o = V_{i1} - V_{io} - ((D - V_{u1}) - (D - V_{uo})) = V_{i1} + V_{u1} - (V_{io} + V_{uo}).$$

A partir de ce raisonnement nous prendrons comme indice de recharge de chaque retenue la valeur :

$$IR = II + IA = (\text{volumes infiltrés} + \text{volumes utilisés}) / \text{volumes stockés}$$

On ne retiendra pas de critère sur l'évaporation étant donné que les indices précédents en tiennent compte indirectement.

Nous avons reporté sur le tableau 13.1 les valeurs de tous les indices caractérisant les 7 retenues étudiées, l'utilisation de leur eaux et leur impact sur la recharge des nappes d'eaux souterraines. Les valeurs figurant sur ce tableau correspondent à la gestion actuelle de ces *presones* qui sont assimilés à des abreuvoirs, sans connexion au réseau de distribution.

Tableau 13.1. Indices initiaux de caractérisation des retenues et de l'usage de l'eau superficielle.

Retenue		IST	IRE	IA %		IB	IS %		DS %	II %		IR %	
		1996	1996	1996	1997	%/..	1996	1997	1996-97	1996	1997	1996	1997
El Muerto	Initial	1,0	0,7	2,6	2,8	1,5	44	13	48	72	30	75	33
Carboneras	Initial	0,3	1,0	0,8	3,6	1,5	80	50	59	66	48	67	52
Pastelero	Initial	1,0	0,8	0,3	0,6	0,8	68	9	23	86	83	86	84
El Viejo	Initial	0,8	1,0	1,1	2,0	2,3	77	57	67	69	51	70	53
El Molino	Initial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0	0	0	-	-	-	-
Oso Negro	Initial	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0	0	0	-	-	-	-
El Tullido*	Initial	0,3	1,0	0,4	1,2	1,5	40	40	61	61	61	61	62
Total sur 7 presones										10,7			

*(1996 et 1997)

Au vu de ce tableau, on peut aisément constater d'importants déversements pour les retenues Carboneras et El Tullido ($IST \ll 1$) en 1996 ainsi qu'un surdimensionnement des retenues El Molino et Oso Negro ($IRE \ll 1$). Pour ces deux retenues il s'agit en fait d'une absence d'écoulement. L'utilisation du volume stocké (IA) apparaît par ailleurs extrêmement faible, toujours inférieure à 4 % et la contribution des 7 *presones* étudiés à l'alimentation en eau du bétail sur l'ensemble du ranch et de 12 / 1000. L'indice d'infiltration (II) montre enfin toute l'importance prise par l'infiltration dans le ranch Atotonilco sur le bilan d'eau des *presones*. Elle est le plus souvent à 60 % atteignant même plus de 80 % pour le *presón* Pastelero.

Au vu de ces résultats, il apparaît que pour faire intervenir de façon efficace dans le système d'exploitation du ranch les 61 retenues d'eau qui y ont été implantées, il est nécessaire de réaliser deux types d'actions principales :

- ♦ augmenter l'utilisation de l'eau stockée par le biais de sa dérivation au réseau de distribution,
- ♦ diminuer l'infiltration au moyen de techniques simples de redimensionnement des retenues et en utilisant éventuellement des matériaux imperméables.

13.2. Connexion des *presones* au réseau de distribution

13.2.1. L'intérêt et les difficultés de l'opération

La proportion de l'eau réellement utilisée par le bétail étant très faible (5 % dans le meilleur des cas), par rapport au volume stocké dans les retenues, une des façons d'y remédier serait d'injecter cette eau dans le réseau de distribution. Cette alternative présente néanmoins certaines difficultés techniques et économiques :

- ♦ Selon les administrateurs du ranch, le principal facteur limitant technique pour intégrer un plus grand nombre de retenues au réseau de distribution est l'envasement des prises de dérivation de l'eau vers les abreuvoirs. Les deux seuls *presones* qui sont actuellement raccordés au réseau de distribution (Cf chapitre 12.4.5) révèlent que la technique utilisée n'est pas la plus appropriée. Le système consiste seulement en un tuyau placé au travers de la digue de retenue et contrôlé en aval par une valve destinée à dériver l'eau vers le réseau. L'inconvénient principal de ce dispositif est l'envasement de la prise d'eau. Cet envasement a finalement découragé les gérants du ranch d'étendre ce dispositif à d'autres retenues. Il existe cependant des techniques de dérivation d'eau qui non seulement sont fiables mais aussi de gestion facile et qui ont été mises en oeuvre à des fins agricoles et décrites par Molle et Cadier (1992). Elles peuvent être facilement adaptées à la majorité des *presones* du ranch avec un coût relativement bas (environ 200 à 300 FF par *preson*) en raison du nombre réduit de pièces nécessaires à leur installation.
- ♦ Une autre difficulté qui se présente est liée à la situation topographique des retenues. Il faut en effet rappeler que la dérivation d'eau vers les abreuvoirs se fait actuellement par gravité à partir de réservoirs installés à une altitude plus élevée. L'intégration des retenues au réseau serait donc réduite aux seules d'entre elles situées en position suffisamment haute pour être raccordées à un réseau de distribution aval.

- ◆ Le principal facteur limitant économique est lié au coût de l'investissement nécessaire à la connexion de la sortie d'eau du *presón* au réseau lui-même. Le coût du mètre linéaire de tuyau oscillant entre 6 et 8 francs (Cf. chapitre 12) limite ce raccordement aux ouvrages qui ne sont pas trop éloignés du réseau de distribution.

Pour toutes ces raisons, le nombre de *presones* qui peuvent être intégrés au réseau existant doit être défini à partir d'études détaillées de faisabilité tant sur les plans physique et topographique que sur le plan économique. Il faut souligner que l'incorporation d'une retenue au réseau diminuerait dans tous les cas la consommation de combustible actuellement nécessaire à l'extraction de l'eau souterraine. Ce raccordement au réseau n'implique pas non plus une intervention en main d'œuvre extraordinaire, mais elle serait du même ordre de grandeur que celle nécessaire à l'installation d'un réservoir.

Par ailleurs, étant donné que, pour la majorité des *presones*, la durée de séjour de l'eau va de août à janvier, son utilisation serait limitée à cette période pour la plupart des retenues, à l'exception de celles de plus grande capacité ou bien de celles qui pourraient être traitées avec de la bentonite.

13.2.2. Exemple des *presones* étudiés

Cinq des sept retenues étudiées ont été sélectionnées pour y réaliser une étude de faisabilité en vue de leur intégration au réseau de distribution : ce sont les retenues de Carboneras, El Muerto, Pastelero, El Tullido et El Viejo. Les deux autres, El Molino et Oso Negro, n'ont pas été retenues en raison de leur remplissage pratiquement nul durant la période d'observation.

Par rapport au réseau de distribution (figure 12.6) et à la topographie du terrain où se trouvent situées ces retenues, il existe diverses possibilités de dériver l'eau vers les abreuvoirs. Le coût de chacune d'elles, proportionnel à la longueur de tuyauterie nécessaire à la connexion, a été évalué pour chacun des *presones* concernés et de nouveaux bilans hydriques ont été calculés avec les données des deux années d'observation (1996 et 1997), afin de déterminer le bien-fondé de l'opération.

Par ailleurs, selon les résultats des enquêtes et des vérifications effectuées sur le terrain, on sait que le temps de séjour de l'eau dans les abreuvoirs varie entre 5 et 12 jours, selon l'époque de l'année et le nombre d'animaux dans l'enclos correspondant. Pour effectuer ce nouveau bilan d'eau, on a considéré dans tous les cas que les abreuvoirs sont remplis tous les 7 jours, en prenant 12,2 m³ comme capacité moyenne de stockage pour chacun. La demande en eau de chacun des systèmes de distribution sélectionnés a ainsi pu être établie et les résultats obtenus sont présentés ci-après.

Presón Carboneras

Grâce à sa situation topographique et géographique, ce *presón* peut être connecté à un réseau formé par 2 forages, une source, 4 réservoirs et 24 abreuvoirs (figure 13.2, annexe XII.4). En accord avec la structuration spatiale de ce système de distribution appelé *Carbonerillas*, l'eau de la retenue peut être dérivée vers le réservoir Carboneras qui alimente à son tour le réservoir El Sol et un

total de 17 abreuvoirs. Pour la réalisation de la connexion entre la retenue et le réservoir Carboneras, le système de dérivation et les 420 mètres de tuyaux nécessaires représentent un coût approximatif de 3 200 FF.

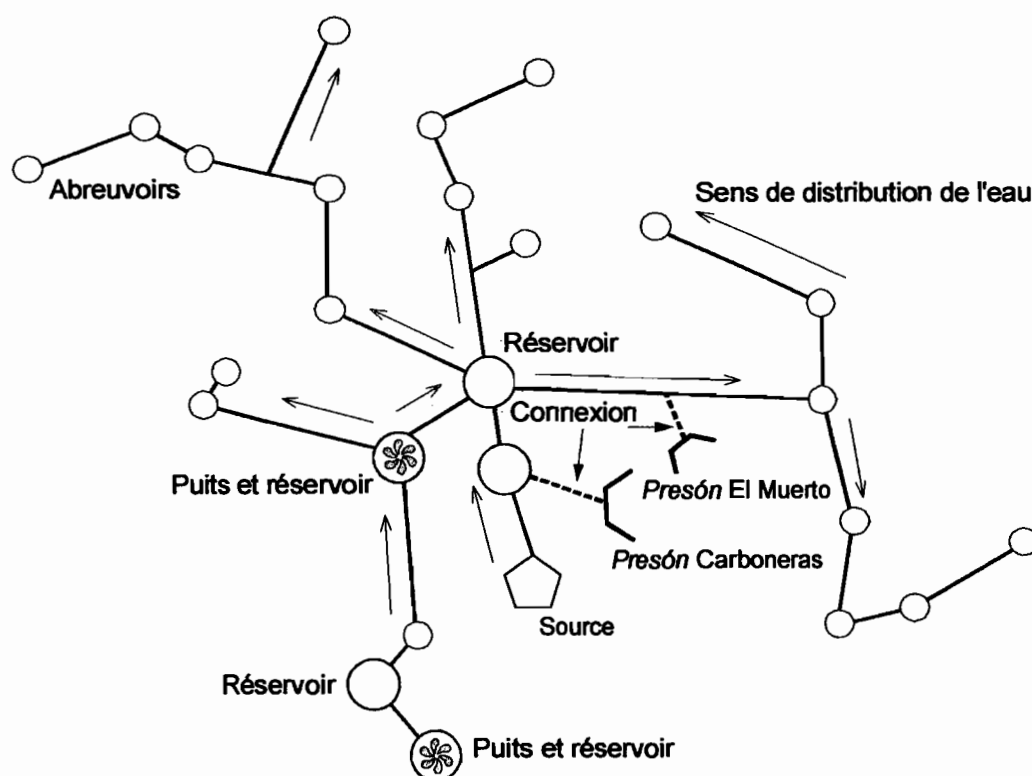


Figure 13.2. Réseau de distribution de l'eau sur lequel peuvent être connectés les *presones* de Carboneras et El Muerto.

La structuration du réseau de *Carbonerillas* montre que le réservoir El Sol distribue l'eau vers trois lignes d'alimentation : la première de 6 abreuvoirs, la seconde de 4 et la troisième de 7 (figure 13.2). De cette manière, le bilan de l'eau a été réalisé en considérant que la retenue alimente la première et la seconde ligne, soit un total de 10 abreuvoirs, la troisième ligne pouvant être alimentée comme on le verra ci-après, par le *presón* El Muerto.

Selon le premier bilan hydrique effectué sur le *presón* Carboneras (Chapitre 11, paragraphe 11.3.2), 3800 m³ d'eau ont été stockés durant l'année 1996. De ce volume total seulement 2,5 % ont été utilisés par le bétail, tandis que le reste s'est infiltré (64 %) ou a été perdu par évaporation (35 %). L'hypothèse d'injecter l'eau de cette retenue dans le réseau de distribution modifie sensiblement ce bilan (tableau 13.2). Le volume utilisé par le bétail augmente en effet de près de 2000 m³, ce qui représente 52 % de l'eau stockée, réduisant par ailleurs les volumes perdus par évaporation et infiltration d'un peu plus de la moitié par rapport à ceux du premier bilan. Néanmoins, ce gain d'eau utilisée n'est pas sans répercussion sur la durée de séjour de l'eau dans la retenue. Durant l'année 1996 par exemple, l'eau a séjourné 264 jours dans la cuvette de Carboneras

et la connexion du *presón* au réseau de distribution ramène ce temps de séjour à 112 jours.

Pour l'année 1997, au cours de laquelle seulement 1675 m³ d'eau ont été emmagasinés dans la cuvette, le volume utilisé par le bétail a été de 1000 m³, soit 60 % du total, et il aurait été possible d'alimenter ces abreuvoirs seulement pendant une période de 56 jours.

Tableau 13.2. Bilan de la dérivation des eaux du *presón* Carboneras.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké	Total évaporé		Total infiltré		Total consommé par le bétail					
						in situ		Par dérivation		Total	
	m³	m³	%	m³	%	m³	%	m³	%	m³	%
Sans dérivation											
1996	3801	1352	34	2527	63	101	2,5			101	2,5
1997	1675	933	52	796	44	64	3,6			64	3,6
En dérivant l'eau vers 10 abreuvoirs											
1996	3801	826	22	1520	40	55	1,4	1400	37	1455	38
1997	1675	485	29	465	28	25	1,5	700	42	725	43

En conclusion, la retenue de Carboneras gagne beaucoup en efficacité d'allocation par simple connexion avec le réseau. La durée de distribution diminue sensiblement mais il faut souligner que le barrage est largement sousdimensionné.

Presón El Muerto

L'eau de cette petite retenue peut seulement être dérivée vers l'une des lignes d'abreuvoirs du réseau *Carbonerillas*, alimentée par le réservoir El Sol (figure 13.2). Cette ligne de distribution est constituée par un total de 7 abreuvoirs, ce qui correspond à une demande hebdomadaire de 85,4 m³. La connexion de cette retenue au réseau nécessite la mise en place de l'équipement de dérivation et de 220 mètres de conduits, ce qui représente un investissement estimé à 1 790 FF.

Selon le premier bilan réalisé pour ce *presón*, le volume total emmagasiné en 1996 a atteint 2345 m³ (Chapitre 11, paragraphe 11.3.2), dont seulement 2,6 % ont été consommés par le bétail. En dérivant l'eau stockée vers le réseau, ce pourcentage atteint 38 %, soit un volume de 892 m³ (tableau 13.3). Quant à la durée de séjour de l'eau dans la cuvette, celle-ci passe de 128 à 70 jours. Pour l'année 1997, l'analyse n'a pu être effectuée en raison du faible remplissage de la retenue.

Tableau 13.3. Bilan de la dérivation des eaux du *presón* El Muerto.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké	Total évaporé		Total infiltré		Total consommé par le bétail					
						in situ		Par dérivation		Total	
	m³	m³	%	m³	%	m³	%	m³	%	m³	%
Sans dérivation											
1996	2345	441	20	1689	77	56	2,6			56	2,6
1997	625	425	68	183	29	17	2,7			17	2,7
En dérivant l'eau vers 7 abreuvoirs											
1996	2345	377	16	1340	57	40	1,7	588	25	628	27

Presón Pastelero

Des 5 *presones* analysés, c'est celui qui a la plus forte capacité de stockage. En relation avec sa situation topographique et avec l'organisation des trois systèmes de distribution situés en aval, il existe quatre possibilités de connexion au réseau (figure 13.3) :

- ♦ une connexion peut être réalisée avec seulement un abreuvoir situé 150 mètres en aval ; elle représente un investissement de 1 300 FF;
- ♦ une seconde possibilité de connexion existe en intégrant deux abreuvoirs supplémentaires et pour laquelle il serait nécessaire de porter la ligne de conduits à 450 mètres, avec un coût total estimé à 4 450 FF;
- ♦ deux abreuvoirs de plus peuvent être agrégés au réseau en étendant la ligne jusqu'à 560 mètres et portant le coût à 8 370 FF,
- ♦ enfin, la quatrième possibilité qui pourrait être envisagée serait d'étendre la connexion jusqu'à 1050 mètres, ce qui permettrait d'ajouter 6 abreuvoirs, mais porterait le coût de l'opération à 15 720 FF.

Les coûts de la seconde, troisième et quatrième opération incluent dans chaque cas les coûts représentés par la possibilité précédente.

Dans cette retenue, un volume total de 19 926 m³ d'eau a été emmagasiné en 1996. Selon le premier bilan réalisé, seulement 0,3 % de ce volume (56 m³) a été utilisé par le bétail, soit une quantité extrêmement faible comparée à la capacité de stockage. Afin d'analyser le bien-fondé de dériver l'eau vers le réseau, un bilan a été établi pour chacune des possibilités envisageables. Ces bilans ont été calculés uniquement pour l'année 1996 étant donné les faibles quantités d'eau emmagasinées en 1997. Les résultats sont présentés ci-après :

- ♦ En considérant que la retenue n'alimente qu'un seul abreuvoir, le volume d'eau utilisé par le bétail atteint 333 m³, soit 1,7 % du volume stocké au cours de l'année (tableau 13.4). Le bilan montre que dans ce cas la période de dérivation possible vers l'abreuvoir serait seulement réduite de 6 jours, passant de 160 à 154 jours.
- ♦ Le bilan établi pour la seconde option (connexion de 3 abreuvoirs) montre que le volume utilisé par le bétail atteint presque 890 m³ (4,5 % du volume stocké en 1996), les quantités perdues par évaporation et infiltration étant légèrement réduites. Cette augmentation du volume d'abreuvement réduit d'autant le temps de séjour de l'eau dans la retenue qui passe de 160 à 147 jours.
- ♦ Si la troisième option est envisagée (connexion de 5 abreuvoirs), avec les données de l'année 96, le pourcentage d'eau utilisé par le bétail double (4,5 à 7,3 % du volume annuel stocké) par rapport à l'option antérieure. En additionnant les quantités d'eau consommées in situ et celles des 5 abreuvoirs aval, ce pourcentage représente un volume de 1 446 m³. Le temps de séjour de l'eau dans la retenue passe quant à lui de 160 à 140 jours.
- ♦ Avec la dernière option envisagée qui prend en compte un total de 11 abreuvoirs, le pourcentage d'eau utilisé augmente nettement, atteignant 15,6 % (3 115 m³). Les quantités évaporées et infiltrées sont sensiblement réduites et le temps de séjour de l'eau dans la *presón* passe de 160 à 126 jours.

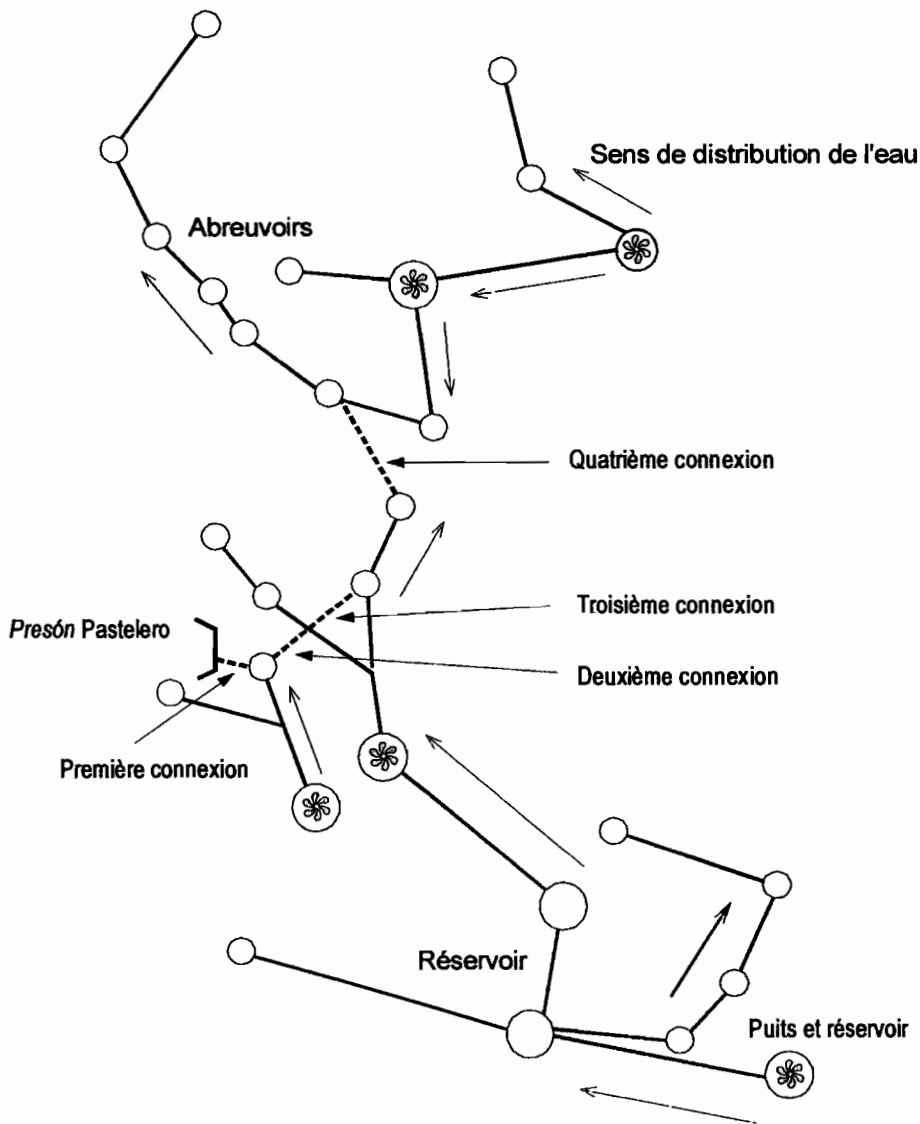


Figure 13.3. Réseau de distribution de l’eau sur lequel peuvent être connecter le presón de Pastelero.

Tableau 13.4. Bilan de la dérivation des eaux du *presón* Pastelero.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké	Total évaporé		Total infiltré		Total consommé par le bétail					
		m³	%	m³	%	in situ		Par dérivation		Total	
		m³	%	m³	%	m³	%	m³	%	m³	%
Sans dérivation											
1996	19927	2756	14	17115	86	56	0,3			56	0,3
1997	1204	194	16	1003	83	7	0,6			7	0,6
En dérivant l'eau vers 1 abreuvoir											
1996	19927	2760	14	16978	85	55	0,3	134	0,7	189	0,9
En dérivant l'eau vers 3 abreuvoirs											
1996	19927	2800	14	16632	83	53	0,3	441	2,2	494	2,5
En dérivant l'eau vers 5 abreuvoirs											
1996	19927	2770	14	16370	82	52	0,3	735	3,7	787	3,9
En dérivant l'eau vers 11 abreuvoirs											
1996	19927	2795	14	15390	77	48	0,2	1694	8,5	1742	8,7

Presón El Tullido

Les possibilités de connexion de ce presón au réseau sont limitées en raison de sa situation topographique. L'eau de la retenue peut seulement être dérivée vers une ligne de 4 abreuvoirs situés en aval, par la mise en place de 1450 mètres de tubes pour un investissement de 10 400 FF.

Le bilan d'eau établi sur cette retenue pour les années 1996 et 1997 montre que son stockage annuel a été de 9 744 m³. De ce volume, 121 m³ ont été utilisés par le bétail in situ, soit 1,2 % de l'eau totale. La dérivation de cette eau vers les 4 abreuvoirs, qui pourraient être alimentés durant 322 jours, fait passer ce pourcentage à 23 % (2 244 m³) et fait baisser de près de 10 points les pourcentages évaporés et infiltrés dans la cuvette durant cette même période.

Tableau 13.5. Bilan de la dérivation des eaux du *presón* El Tullido.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké m ³	Total évaporé		Total infiltré		Total consommé par le bétail					
		m ³	%	m ³	%	in situ		Par dérivation		Total	
						m ³	%	m ³	%	m ³	%
Sans dérivation											
1996 et 1997	9744	3688	38	5935	61	121	1,2			121	1,2
En dérivant l'eau vers 4 abreuvoirs											
1996 et 1997	9744	3141	32	5093	52	110	1,1	1400	14	1510	15

Presón El Viejo

La position topographique de ce *presón* permet de le raccorder à deux lignes de distribution d'eau : l'une de 4 abreuvoirs par l'installation de 430 mètres de tuyaux (figure 13.4) pour un coût total de 3 200 FF ; la seconde possibilité permet d'ajouter 3 abreuvoirs de plus en portant la ligne de connexion à 950 mètres pour un investissement additionnel de 6 650 FF, ce qui mettrait le coût total de raccordement des 7 abreuvoirs à 9 850 FF.

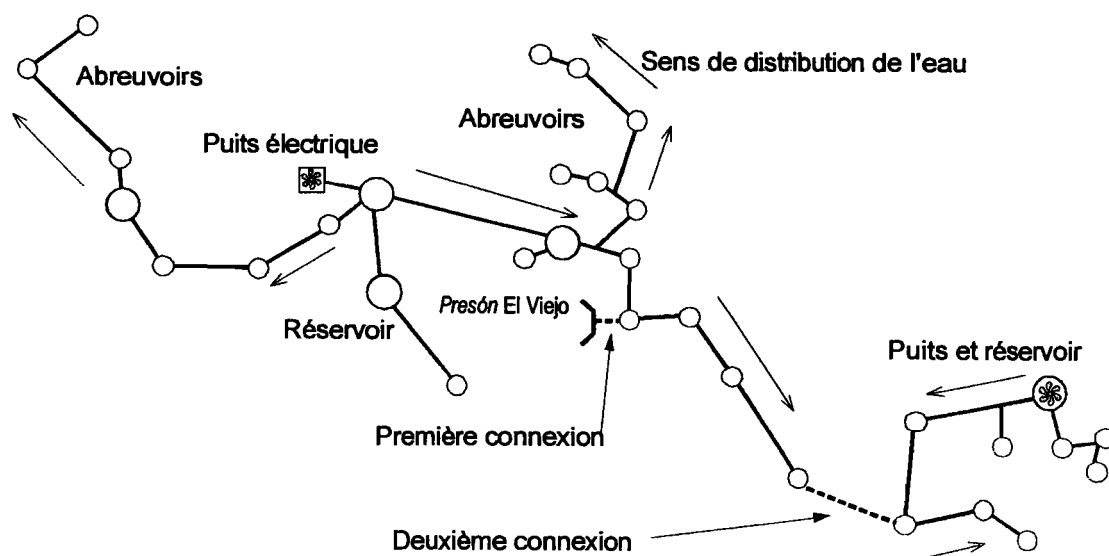


Figure 13.4. Réseau de distribution de l'eau sur lequel peuvent être connecter le *presón* de El Viejo.

En 1996, 13 073 m³ furent emmagasinés dans cette retenue. Pour cette même année, le bilan établi pour la première option de connexion (4 abreuvoirs) montre une augmentation importante du volume d'abreuvement dont le pourcentage passe de 1,4 à 12 % (tableau 13.6). Le volume infiltré est diminué de 7 % et le volume évaporé de 3 %, tandis que le temps de séjour de l'eau dans la cuvette passe de 238 à 196 jours.

Avec 7 abreuvoirs, le pourcentage d'eau utilisée atteint 19,4 % (2 539 m³), les volumes infiltrés se voient réduits de près de 13 % et ceux évaporés d'un peu moins de 5 %. Quant au temps de séjour de l'eau dans la cuvette, il est pratiquement identique à celui de la première option.

Pour l'année 1997, le stockage est réduit à 6 655 m³ dont 20 % sont utilisés par le bétail dans le cas de la première option et 33 % dans le cas de celle avec 7 abreuvoirs mais avec une alimentation durant 175 jours.

Tableau 13.6. Bilan d'eau du *presón* El Viejo après connexion.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké	Total évaporé		Total infiltré		Total consommé par le bétail					
		m ³	%	m ³	%	in situ		Par dérivation		Total	
	m ³	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%
Sans dérivation											
1996	13074	3842	29	9050	69	181	1,4			181	1,4
1997	6655	3122	47	3400	51	133	2,0			133	2,0
En dérivant l'eau vers 4 abreuvoirs											
1996	13074	3595	27	8435	65	175	1,3	868	6,6	1043	8,0
1997	6655	2750	41	2975	45	118	1,8	812	12	930	14,0
En dérivant l'eau vers 7 abreuvoirs											
1996	13074	3420	26	8065	62	168	1,3	1421	11	1589	12
1997	6655	2570	39	2770	42	90	1,4	1225	18	1315	20

13.2.3. Analyse des différentes possibilités de connexion des *presones* au réseau de distribution de l'eau

Tableau 13.7. Comparaison des indices de valorisation de l'eau des retenues avant et après connexion au réseau de distribution.

Retenue		IA		IB	IS %		DS %	II %		IR %	
		1996	1997	%/..	1996	1997	1996	1996	1997	1996	1997
El Muerto	Initial	2,6	2,7	1,5	36	11	35	72	30	75	33
	AD	27	2,7	27	23	0,6	23	57	30	84	33
Carboneras	Initial	2,5	3,6	1,5	65	41	73	66	48	69	52
	AD	38	43	37	37	18	38	40	28	78	71
Pastelero	Initial	0,3	0,6	0,8	68	9,0	40	86	83	86	84
	AD	8,7	0,6	40	42	0,2	37	77	83	86	84
El Viejo	Initial	1,4	2,0	2,3	77	57	65	69	51	70	53
	AD	12	20	28	56	46	59	62	42	74	62
El Tullido	Initial		1,2	1,5		40	61		61		62
	AD		16	17		44	44		52		68

L'analyse des bilans d'eau, établis pour chacun de *presones* selon différentes options de connexion au réseau, montre que dans tous les cas (tableau 13.7) le volume d'eau utilisé par le bétail s'accroît de manière très importante pour tous les *presones* après connexion, sauf en 1997 pour les retenues où le niveau d'eau est resté insuffisant (El Muerto et Pastelero). Ainsi, l'indice IB d'utilisation de l'eau des *presones* à l'échelle du ranch passe de 11 / 1000 à 152 / 1000 après connexion. Néanmoins, étant donné la variabilité des coûts d'investissement selon l'option retenue, il s'avère indispensable d'évaluer le bénéfice réellement obtenu dans chaque cas particulier. Si, par exemple, on prend un débit moyen d'extraction de 20 litres d'eau par minute pour chaque forage, le remplissage partiel (7 m³) d'un seul abreuvoir de 12,2 m³ de capacité nécessite en moyenne, avec les équipements actuels, nécessite 6 heures de fonctionnement d'un moteur diesel. Sachant que ce moteur consomme 7 litres de carburant pour 6 heures de fonctionnement, ceci signifie que le remplissage partiel de cet abreuvoir nécessite en moyenne un peu moins de 7 litres de gasoil. Au prix actuel du litre de gasoil (3,2 FF), le prix de revient en carburant de ce remplissage est de 23 FF en moyenne. A ce coût d'extraction de l'eau souterraine (3,3 FF le m³), il est évident que pour certains *presones* comme Carboneras, l'investissement nécessaire à la connexion au réseau aurait été récupérée durant la seule année 1996. En effet, la connexion au réseau de distribution permet de fournir à l'abreuvement plus de 1000 m³ pour l'année 1996 alors que le coût de la connexion a été évaluée à 3200 FF. Dans d'autres cas, comme le *presón* Pastelero par exemple, trois années identiques à 1996 seraient nécessaires à la récupération de l'investissement.

Par ailleurs, la demande en eau des abreuvoirs est constante durant toute l'année mais d'autant plus forte et indispensable que la saison est plus sèche, de février à mai, période durant laquelle la majorité des *presones* sont secs. Après connexion, les deux indices globaux de satisfaction des besoins, l'indice volumétrique IS et l'indice temporel DS, varient dans le même sens. Ils diminuent mais dans proportions plus ou moins fortes selon les retenues. Une forte diminution de l'indice IS semble indiquer une capacité insuffisante à la fourniture des abreuvoirs alimentés par la retenue. De faibles indices de satisfaction devraient donc inciter le chef d'exploitation à intervenir pour redimensionner la retenue ou changer le mode d'alimentation des abreuvoirs. La diminution des pertes par évaporation et infiltration est également une solution pour prolonger le temps de séjour de l'eau dans les retenues et présente pour cette raison un certain intérêt, permettant en outre une récupération plus rapide de l'investissement nécessaire à la réalisation des travaux de dérivation vers le réseau.

En ce qui concerne le bilan en eau des eaux souterraines, bien que la dérivation diminue le volume infiltré (indice II), elle accroît positivement le bilan des eaux souterraines de manière inégale mais systématique. Elle constitue donc à la fois une solution économiquement très intéressante et favorable à la recharge des aquifères.

13.3. Modification de la géométrie des retenues d'eau

Un des moyens de conserver l'eau dans les retenues est de réduire les superficies évaporantes et infiltrantes en modifiant la géométrie des cuvettes. Selon Molle et Cadier (1992), la géométrie de la retenue doit être définie en fonction de son usage :

- ♦ les retenues de stockage doivent être profondes et peu étendues,
- ♦ les retenues à usage piscicole doivent être étendues et peu profondes et la superficie exposée à l'air et la superficie exposée à l'air doit varier le moins possible au fur et à mesure de l'abaissement du niveau d'eau,
- ♦ les retenues destinées à une agriculture de décrue, sur les bords desquelles des cultures peuvent être conduites au fur et à mesure du retrait de l'eau, doivent être étendues et peu profondes et la superficie exposée à l'air doit diminuer fortement avec le niveau d'eau,
- ♦ enfin pour les retenues dont l'eau est destinée à l'irrigation, il faut considérer à la fois leur profondeur et leur capacité de stockage qui doivent être importantes.

Dans le ranch Atotonilco, le personnel chargé de la construction et du redimensionnement des cuvettes, à de rares exceptions, ne prend pas en compte ce type de considérations. En effet, pour la majorité des *presones* les profondeurs ne dépassent pas 2,5 mètres et dans beaucoup de cas l'importante superficie du plan d'eau favorise tant l'évaporation que l'infiltration.

Si on envisage la possibilité de dériver l'eau des retenues jusqu'aux abreuvoirs, il est aussi nécessaire de reconsidérer la forme des retenues afin de diminuer les pertes par débordement, évaporation et infiltration. Dans le but d'examiner le bien-fondé de ce type d'aménagement des retenues, nous avons modifié à titre d'exemple la géométrie des *presones* Carboneras et El Viejo. Les bilans d'eau utilisés pour cette simulation sont ceux des années 1996 et 1997. Ils prennent en compte tant l'abreuvement in situ que les dérivations vers le réseau de distribution.

13.3.1. Presón Carboneras

La modification de la géométrie de cette retenue consiste à augmenter sa profondeur maximale de 2 à 4 mètres en conservant ses longueur et largeur actuelles avec une forme plus régulière de la cuvette. La figure 13.5 présente les courbes hauteurs-volume et hauteur-superficie de la cuvette Carboneras avant et après ce changement de forme. Celui-ci permet de passer d'une capacité de 1 880 à 4 027 m³, soit un accroissement de 114 % ; la superficie du plan d'eau passe de 1 650 à 2 287 m², soit une augmentation de seulement 38 % et la superficie infiltrante s'accroît d'un pourcentage équivalent (31 %). Cette augmentation de la capacité de stockage, avec une diminution relative des superficies exposées, permet de faire passer l'indicateur d'efficacité géométrique de ce *presón* de 0,28 à 0,34.

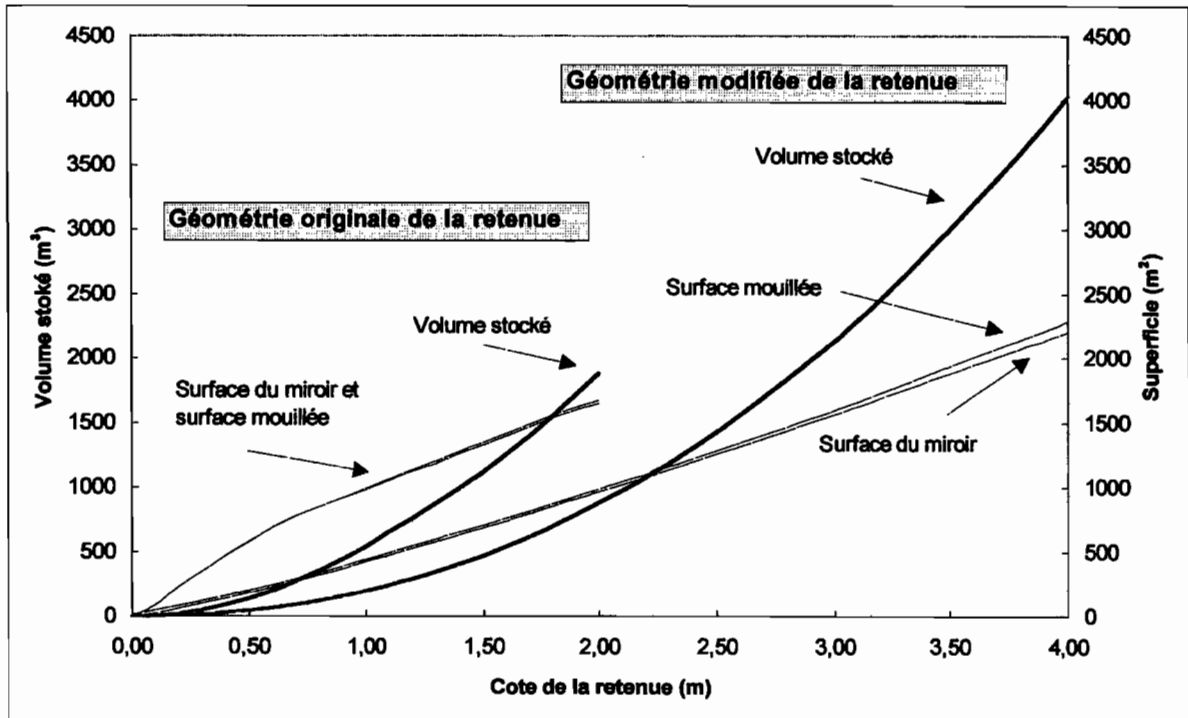


Figure 13.5. Courbes hauteurs-volumes et hauteurs-superficies du *presón* Carboneras avant et après le changement de forme de la retenue.

Une fois établie la nouvelle forme de la cuvette, nous avons reconstitué la variation du niveau d'eau durant les années 1996 et 1997 à partir des données d'évaporation et d'infiltration obtenues durant cette période (Cf. chapitre 11).

Ces nouveaux bilans (tableau 13.8) ont été établis par rapport à deux types d'utilisation de l'eau par le bétail : directement à partir de la retenue comme c'est le cas actuellement ou après dérivation vers le réseau des 10 abreuvoirs (Cf paragraphe 13.2). Les variations reconstituées du niveau d'eau correspondant à ces deux options pour les deux années d'observation sont présentées sur les figures 13.6 A et B.

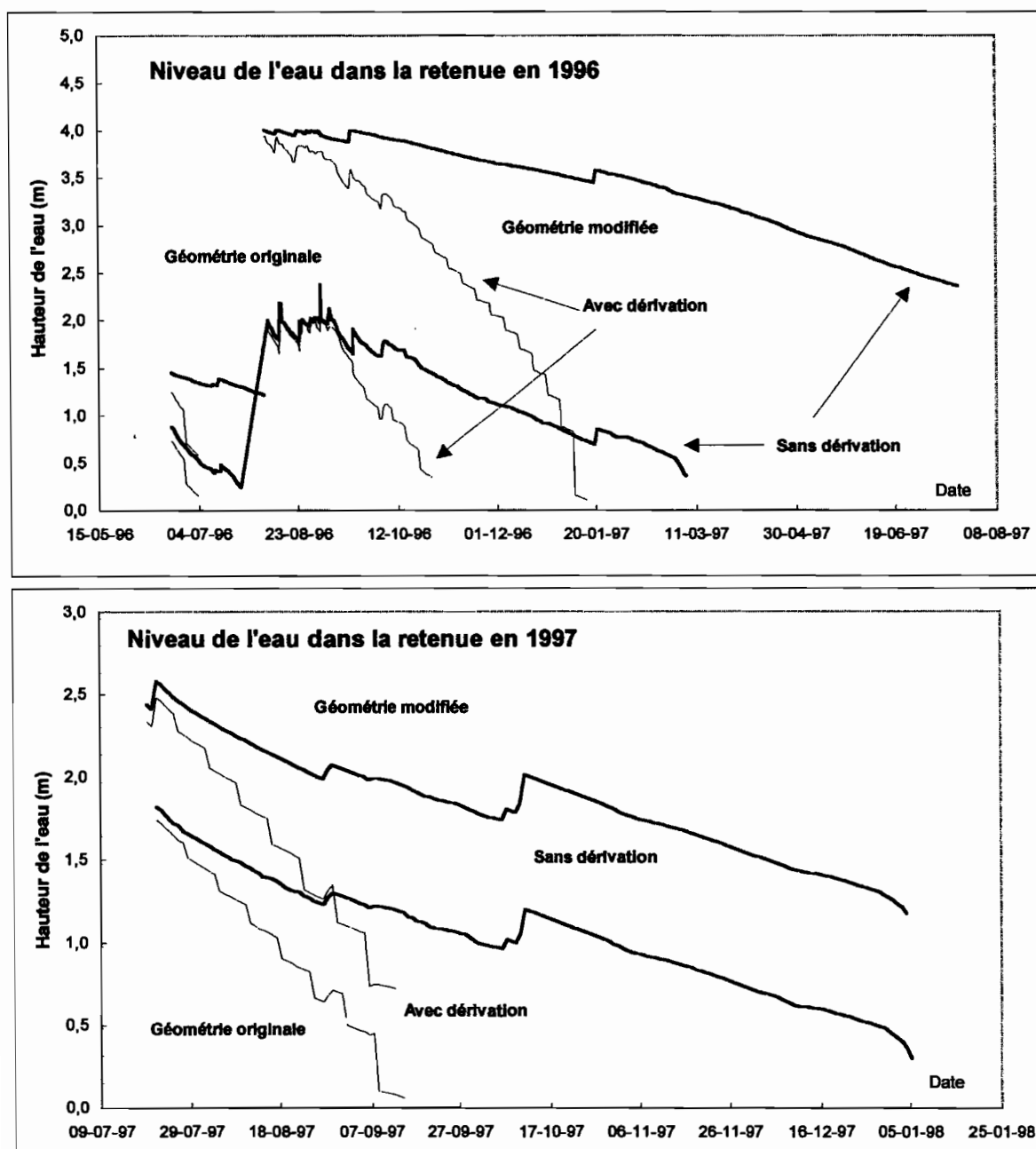


Figure 13.6. Evolution des niveaux d'eau de la retenue Carboneras en 1996 (A) et en 1997 (B) avant et après dérivation, avant et après modification de la géométrie de la cuvette.

Tableau 13.8. Bilan d'eau de la retenue Carboneras après modification de la géométrie de la cuvette.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké (m ³)	Total évaporé m ³	%	Total infiltré m ³	%	Total consommé par le bétail m ³	%
Sans dérivation							
1996	6172	2479	40,2	3527	57	166	2,7
1997	1675	708	42,3	895	53	71	4,3
En dérivant l'eau vers 10 abreuvoirs							
1996	6171	1138	18,4	2512	41	2520	41
1997	1675	214	12,8	551	33	910	54

On constate que la seule modification de la forme de la cuvette de rétention, permet, en 1996, d'augmenter le volume stocké de 3 800 à 6 172 m³, pour un volume écoulé de 12 152 m³.

Avec la seule utilisation de l'eau in situ, on observe que l'accroissement du volume utilisé n'est pas significatif par rapport à la forme originelle du *presón*. Le volume utilisé passe ainsi de 0,8 à 2,7 % en 1996, de 3,6 à 4,3 % en 1997. Cependant, la comparaison des temps de séjour de l'eau dans la retenue montre que celui-ci est nettement supérieur dans le *presón* à géométrie modifiée : en 1996, l'eau aurait pu séjourner pratiquement toute l'année dans la retenue (figure 13.6 A), alors que dans la cuvette originelle elle ne séjourne que jusqu'au début mars de l'année suivante. Cette augmentation est moins évidente pour l'année 1997, principalement en raison du faible volume stocké. Néanmoins, au début de l'année 1998 la cuvette à géométrie modifiée compte encore un volume de 272 m³ alors qu'elle est à sec dans sa forme originelle.

Les gains les plus significatifs sont obtenus par dérivation de l'eau vers le réseau d'abreuvoirs. Ainsi, le volume utilisé par le bétail passe de 2 000 à 3 433 m³ en 1996 dans la retenue modifiée bien que les indices d'allocation soient identiques. De la même manière, la période pendant laquelle le bétail peut être abreuvé s'accroît de 16 à 25 semaines. En 1997, aucun gain significatif n'apparaît ni dans le volume utilisé par le bétail, ni dans la période pendant laquelle il peut être abreuvé.

13.3.2. Presón El Viejo

Comme pour Carboneras, la modification géométrique de cette retenue a consisté en une augmentation de sa profondeur maximale de 2,32 à 5 mètres en conservant sa largeur, limitée par les conditions topographiques du site, et en diminuant sa longueur de 30 mètres. La cuvette prend ainsi une forme plus régulière. La figure 13.7 présente les courbes hauteurs-volumes et hauteurs-superficies du miroir et hauteurs-superficies mouillées de la retenue avant et après la modification simulée de sa géométrie. Ceci a permis de faire passer la capacité de stockage de 6 720 à 9 800 m³, soit un accroissement de 46 %. La superficie de l'eau exposée à l'évaporation passe alors de 6 110 à 4 458 m², soit une réduction de 27 %. La surface mouillée augmente à peine de 6,7 % (6 152 à 6 566 m²). Cet accroissement sensible du volume stocké par rapport aux superficies du miroir et du fond de la retenue permet un accroissement de 0,18 à 0,25 de l'indicateur d'efficacité géométrique (Cf. chapitre 11, paragraphe 11.1.2).

Comme pour le *presón* Carboneras, une fois établie la nouvelle forme de ce *presón*, nous avons procédé à la reconstitution de la variation du niveau de l'eau dans la retenue durant les années 1996 et 1997 en prenant en compte les mêmes données d'évaporation et d'infiltration que celles obtenues sous les conditions géométriques actuelles (Cf. chapitre 11). Les résultats obtenus (tableau 13.9) prennent en compte les deux formes d'utilisation de l'eau par le bétail : un abreuvement in situ et la dérivation vers un réseau de 7 abreuvoirs (Cf. paragraphe 13.2). Les variations des niveaux de l'eau au cours des deux années sont également présentées sur les figures 13.8 A et B.

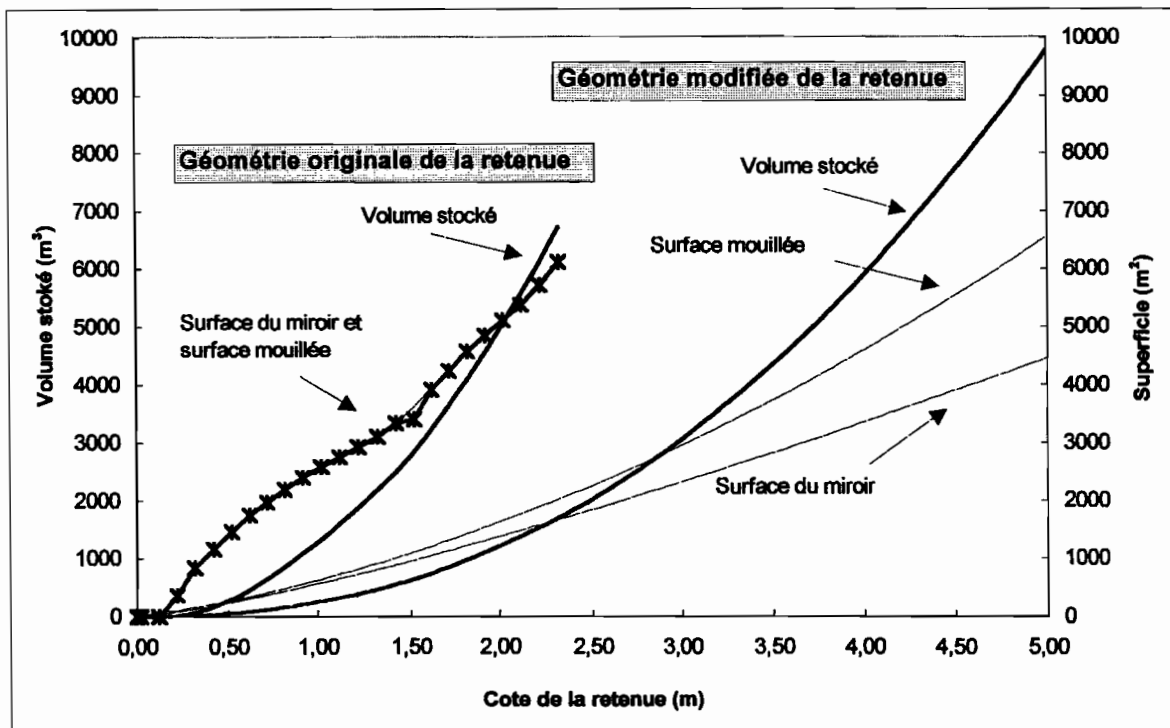


Figure 13.7. Courbes hauteurs-volumes et hauteurs-superficies du *presón* El Viejo avant et après le changement de forme de la retenue.

Tableau 13.9. Bilan d'eau de la retenue El Viejo après modification de la géométrie de la cuvette.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké (m ³)	Total évaporé m ³	%	Total infiltré m ³	%	Total consommé par le bétail m ³	%	Eau restée dans la retenue m ³	%
Sans dérivation									
1996	13302	4381	32,9	7701	58	325	2,4	895	6,7
1997	6655	2530	38,0	1871	28	249	3,7	2005	30
En dérivant l'eau vers 10 abreuvoirs									
1996	13302	4760	35,8	6190	47	2282	17	70	0,5
1997	6655	2270	34,1	2442	37	1873	28	70	1,1

Le changement de la forme de la cuvette ne permet pratiquement pas d'augmenter le volume stocké en 1996. Il faut ainsi signaler que l'accroissement de la capacité de stockage n'accroît pas nécessairement le volume emmagasiné car celui-ci est fonction de l'importance des écoulements et surtout de leur occurrence. Lors d'un événement important, se produisant par exemple lorsque la retenue est vide, la majeure partie de l'eau sera captée, alors que si elle est pleine la totalité sera perdue par déversement.

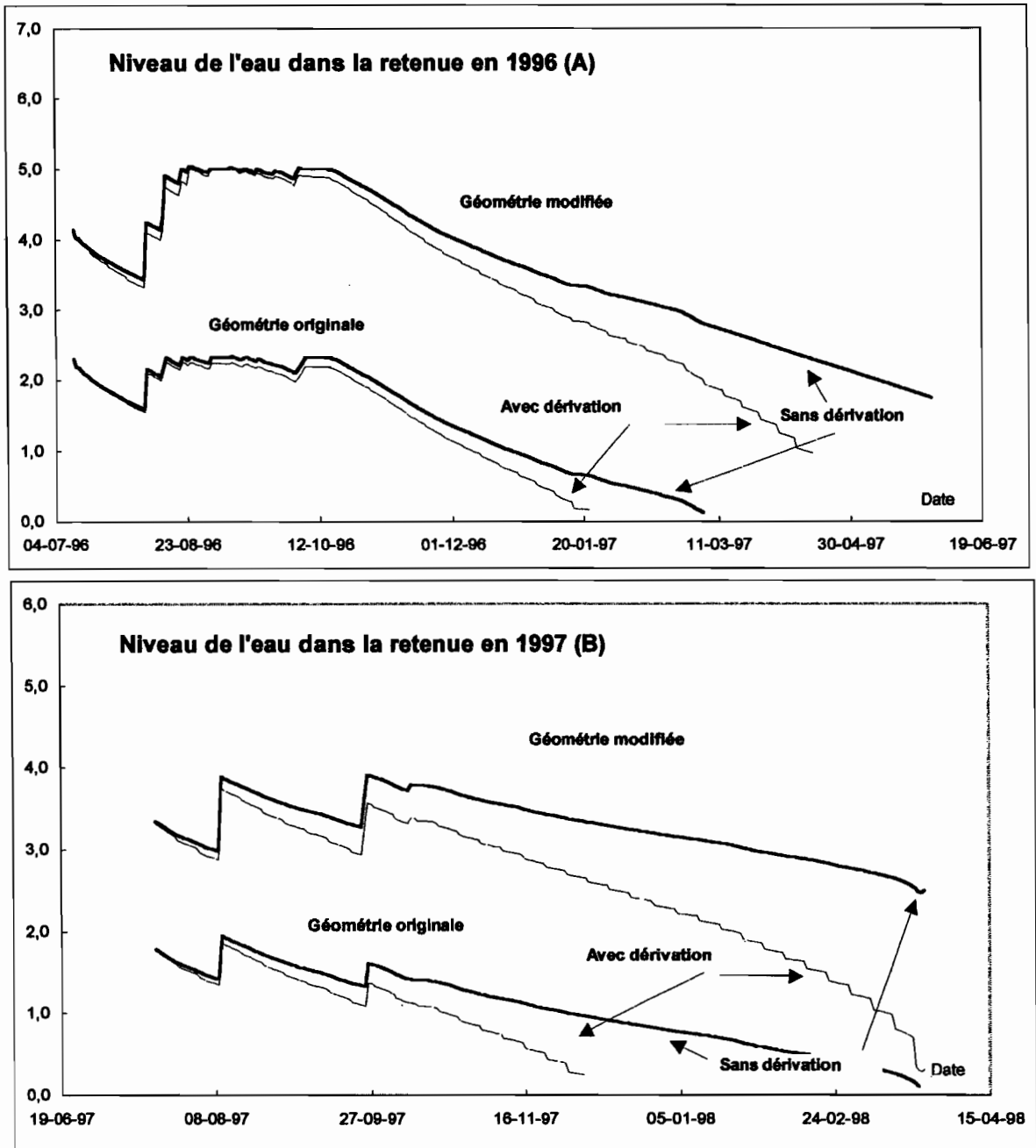


Figure 13.8. Evolution des niveaux d'eau de la retenue El Viejo en 1996 (A) et en 1997 (B) avant et après dérivation, avant et après modification de la géométrie de la cuvette.

Sous la première option d'abreuvement, sans connexion, on observe pour ce presón un comportement similaire à celui de Carboneras. L'accroissement du volume d'eau utilisé par le bétail n'est pas significatif par rapport à la consommation mesurée sous la forme originelle. Celle-ci passe de 1,1 à 2,3 % en 1996 et de 2,0 à 5,4 % en 1997. Le temps de séjour de l'eau dans la cuvette est par contre nettement supérieur après modification de la géométrie et elle se maintient en eau pratiquement toute l'année 1996 (figure 13.8) alors qu'elle s'assèche au début du mois mars en l'absence de modification géométrique. En 1997, le bilan a été fait jusqu'à 25 mars 1998 (249 jours), date à laquelle la retenue modifiée stocke encore 2 000 m³.

Du point de vue bilan, en considérant la connexion au réseau de distribution (7 abreuvoirs), le volume total d'eau utilisée en 1996 a été de 2 286 m³. Ce volume passe à 3 013 m³ après modification de la forme de la cuvette. De la même façon la durée d'alimentation des abreuvoirs passe de 25 semaines à 40 semaines si on en modifie la géométrie de la cuvette.

Pour l'année 1997, le volume utilisé a été estimé à 2 225 m³ tandis qu'avec la géométrie modifiée il atteint 3 265 m³. Cette modification influence également la durée d'alimentation vers les abreuvoirs, laquelle passe de 20 semaines à un peu plus de 35 semaines.

Tableau 13.10. Indices de caractérisation des retenues, de valorisation des eaux stockées et d'impact sur le bilan des nappes avant et après modification de la géométrie des cuvettes des *presones* Carboneras et El Viejo.

		Retenue	ID	IC	IA %		IS %		II en %		IR en %	
					1996	1997	1996	1997	1996	1997	1996	1997
GO	*AD	Carboneras	0,31	1,00	38	43	37	18	40	28	78	71
GM	AD	Carboneras	0,51	1,00	41	54	63	23	41	33	82	87
GO	AD	El Viejo	0,77	1,00	12	20	56	46	62	42	74	62
GM	AD	El Viejo	0,84	1,00	17	28	80	66	47	37	64	65

GO Géométrie originale * AD Avec dérivation vers les abreuvoirs
GM Géométrie modifiée

La modification de la géométrie de la retenue augmente bien évidemment la capacité de stockage mais également de manière très importante l'indice de satisfaction de besoins (IS), lequel s'accroît de 20 à 30 % en année normale (1996), de 10 à 20 % en année très sèche (1997). Un surcreusement important (El Viejo) sans augmentation de l'infiltration, conduit à conserver un certain volume d'eau dans la retenue d'une année sur l'autre comme en 1996 dans la retenue El Viejo, ce qui conduit à une diminution de l'indice de bilan des nappes (IR).

13.4. Imperméabilisation du fond des retenues

Les conditions actuelles de gestion analysées au chapitre 11 ont montré que les pertes par infiltration représentent plus de 50 % du volume total emmagasiné. Une alternative qui peut être envisagée est la mise en place de matériaux imperméables dans les cuvettes. Dans le ranch, ainsi qu'aux environs immédiats, il existe de nombreux gisements de bentonite et celle-ci est exploitée à ciel ouvert et commercialisée dans les zones urbaines pour l'imperméabilisation des puits profonds. Dans le ranch, il existe au moins deux affleurements de cette argile et ils n'ont jusqu'ici pas été exploités par les propriétaires. C'est une alternative intéressante, facile à mettre en œuvre avec les moyens du ranch, pour diminuer l'infiltration dans les fonds de cuvette. Pour recouvrir de 2,5 cm le fond de la cuvette Carboneras, 57 m³ de bentonite seraient nécessaires, tandis que la retenue El Viejo en nécessiterait un peu plus de 160 m³.

Un des inconvénients que peut présenter cette technique concerne la sédimentation dans la retenue qu'il faut périodiquement nettoyer pour en maintenir la capacité de stockage. Ce faisant, il faut éviter de retirer en même temps la bentonite mise en place.

Afin d'analyser l'impact de cette technique, de nouveaux bilans ont été établis à partir des données de stockage dans les presones Carboneras et El Viejo en considérant une utilisation de l'eau in situ avec dérivation en y ajoutant les modifications géométriques décrites ci-dessus (Cf paragraphe 13.3).

13.4.1. Presón Carboneras

Pour la reconstitution des volumes, les mêmes taux d'évaporation que ceux déterminés au chapitre 11 ont été pris en compte. L'infiltration a été considérée comme négligeable en supposant un épandage de bentonite régulier dans toute la cuvette. Les résultats de ces bilan, établis pour les années 1996 et 1997, sont présentés dans le tableau 13.11.

Tableau 13.11. Bilan de l'eau dans la retenue Carboneras après modification géométrique et imperméabilisation de la cuvette.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké (m³)	Total évaporé		Total consommé par le bétail	
		m³	%	m³	%
Sans dérivation					
1996	5015	4849	97	166	3,3
1997	1675	1603	96	71	4,3
En dérivant l'eau vers 10 abreuvoirs					
1996	5090	1870	37	3220	63
1996	1674	484	29	1190	71

Avec l'imperméabilisation de la cuvette de rétention, le volume total emmagasiné en 1996 est plus faible que celui obtenu en modifiant sa forme géométrique : 5 015 m³ contre 6 172 m³. Cette diminution du volume total emmagasiné va de pair avec l'augmentation du volume déversé.

L'analyse de l'utilisation de l'eau in situ sans dérivation montre que le pourcentage utilisé reste identique avec la bentonite et seuls varient les volumes d'eau restant dans la cuvette.

Dans le cas de la dérivation de l'eau vers le réseau, les pourcentages d'utilisation s'accroissent, atteignant 70 % du volume total emmagasiné en 1997, plus de 60 % en 1996. Ainsi, en 1996, 10 abreuvoirs peuvent être alimentés pendant 31 semaines, c'est à dire 6 de plus qu'en modifiant seulement la géométrie de la cuvette (figure 13.9). En 1997, l'imperméabilisation de la retenue permet un accroissement de 2 semaines des possibilités d'alimentation des abreuvoirs, lesquelles passent de 8 à 10 semaines.

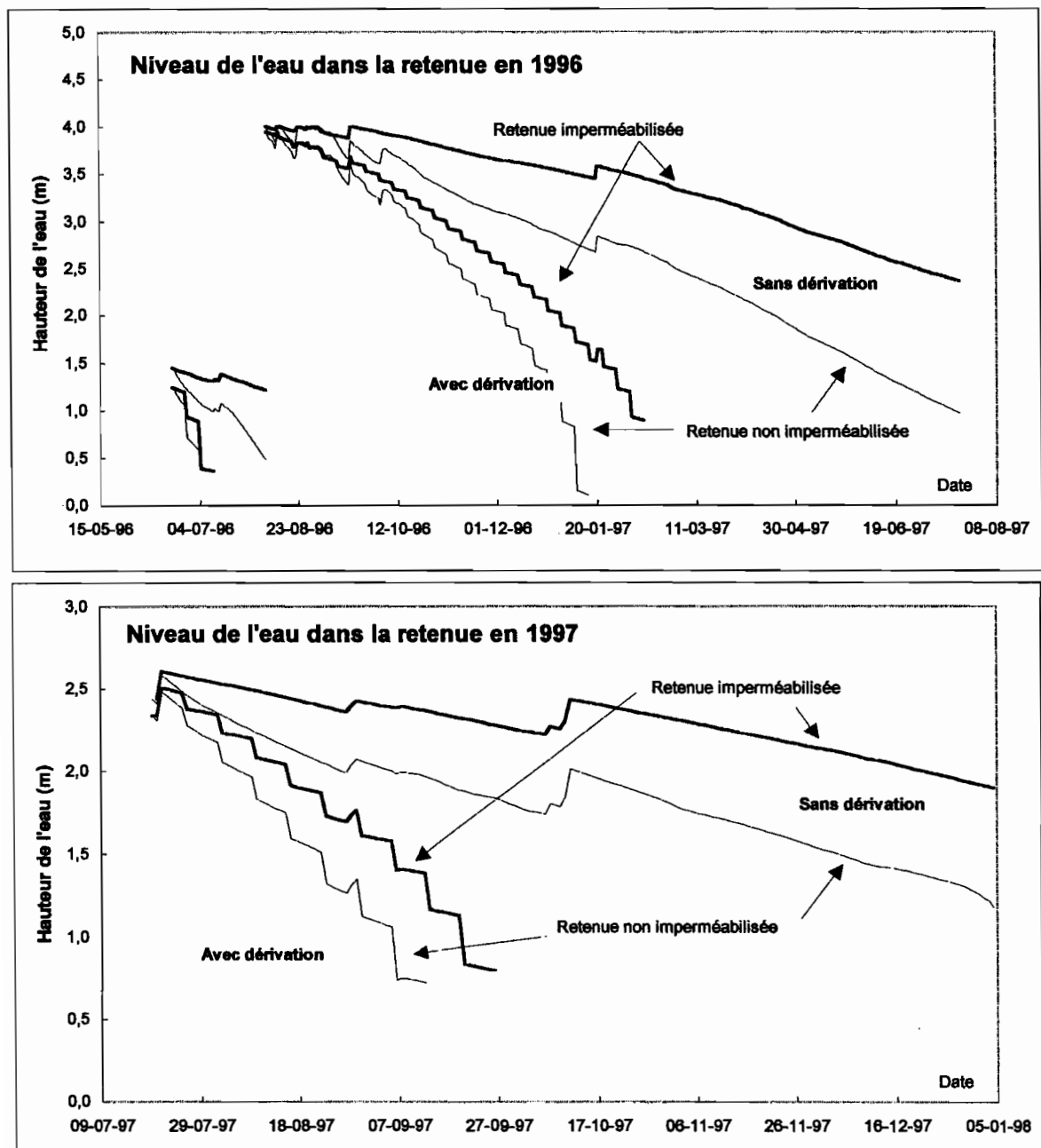


Figure 13.9. Variation des niveaux d'eau dans la retenue Carboneras après modification de la géométrie et imperméabilisation de la cuvette.

13.4.2. Presón El Viejo

Les résultats des bilans établis pour 1996 et 1997 sont présentés dans le tableau 13.12.

Tableau 13.12. Bilan de l'eau dans la retenue El Viejo après modification géométrique et imperméabilisation de la cuvette.

Volume d'eau dans la retenue	Total stocké (m³)	Evaporé		Consommé par le bétail		Eau restée dans la retenue	
		m³	%	m³	%	m³	%
Sans dérivation							
1996	11071	5903	53	325	2,9	4842	44
1997	6655	2310	35	249	3,7	4095	62
En dérivant l'eau vers 10 abreuvoirs							
1996	11071	4976	45	2461	22	3634	33
1996	6655	2078	31	1885	28	2692	40

De même que pour Carboneras, l'imperméabilisation de la cuvette ne permet pas, en 1996, d'atteindre un volume stocké aussi important que celui obtenu en modifiant seulement sa forme géométrique.

L'analyse de l'utilisation de l'eau in situ montre que le volume d'eau utilisé est identique avant et après imperméabilisation. Les temps de séjour de l'eau dans la retenue sont également similaires à ceux de la retenue avant imperméabilisation et seuls varient les volumes d'eau restant dans la cuvette.

Dans le cas de la dérivation vers le réseau de distribution, les pourcentages d'eau utilisée en 1996 s'accroissent de 23 à 46 % avec une imperméabilisation. En 1997, ce même pourcentage passe de 50 à 61 %. De même, la retenue imperméabilisée offre la possibilité d'alimenter les 7 abreuvoirs pratiquement toute l'année tant en 1996 qu'en 1997 (figure 13.10).

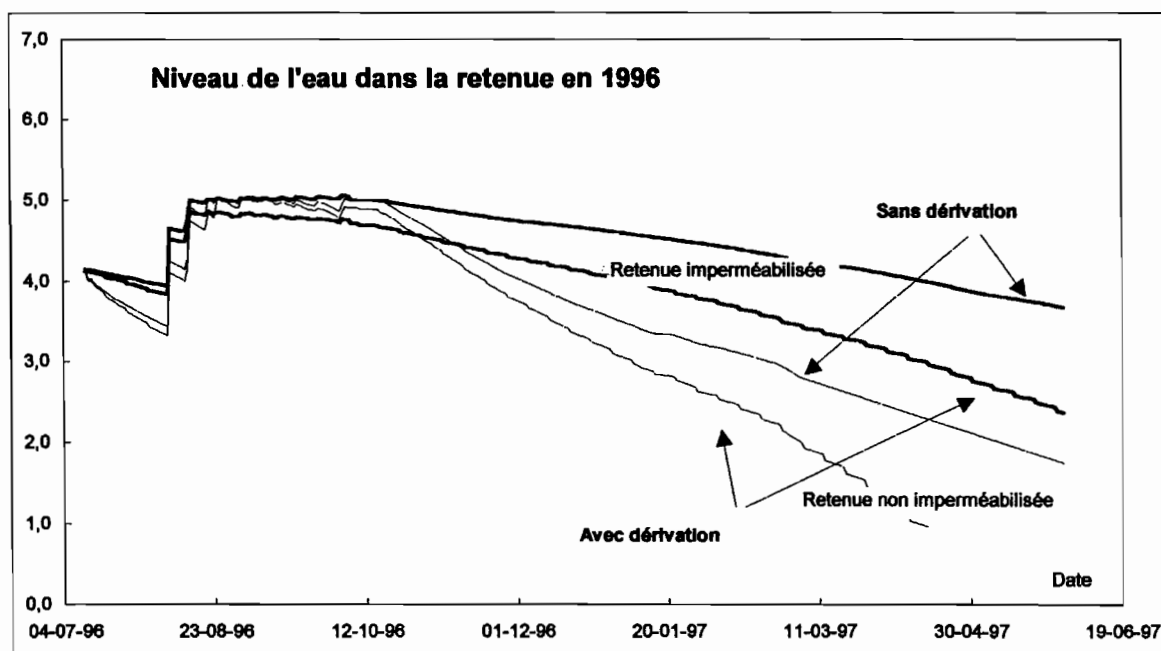


Figure 13.10 A. Variation des niveaux d'eau dans la retenue El Viejo en 1996 après modification de la géométrie et imperméabilisation de la cuvette.

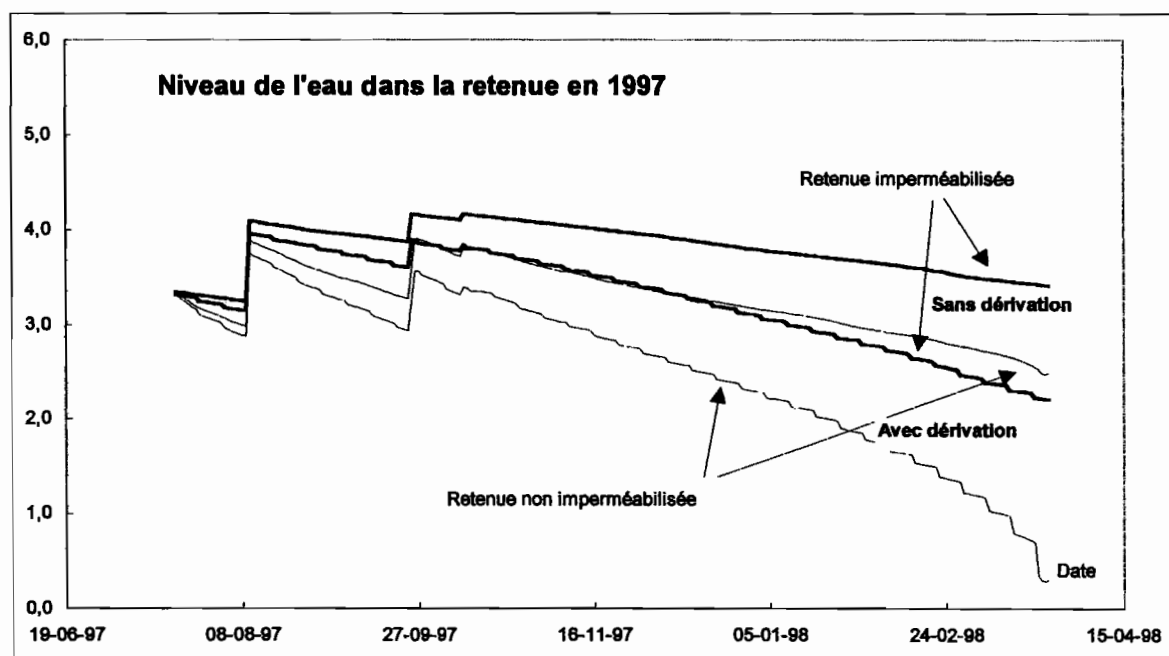


Figure 13.10. B Variation des niveaux d'eau dans la retenue El Viejo en 1997 après modification de la géométrie et imperméabilisation de la cuvette.

Tableau 13.13. Indices de valorisation des eaux après modification de la géométrie et imperméabilisation des retenues Carboneras et El Viejo.

Retenue			IA %		IS %	
			1996	1997	1996	1997
GM	*SD	Carboneras	3,3	4,2	100	46
	**AD	Carboneras	63	71	81	30
GM	SD	El Viejo	2,9	3,7	59	46
	AD	El Viejo	22	28	86	66

* SD Sans dérivation vers les abreuvoirs

Après imperméabilisation et modification de la géométrie des cuvettes, les indices de valorisation des eaux superficielles du tableau 13.13 montrent un net accroissement des volumes alloués à l'abreuvement du bétail avec un indice de satisfaction de 100 % sans dérivation et, après dérivation, des valeurs de l'ordre de 80 à 90 % en année normale, de 30 à 60 % en année très sèche. La valeur de 30 % est relative au *presón* Carboneras pour lequel l'année 1997 est d'une sécheresse exceptionnelle, de période de retour probablement très supérieure à 20 ans.

13.5. Conclusion

En l'état actuel de la gestion des eaux dans le ranch Atotonilco, les *presones* ne couvrent que 1 % des besoins en eau associés à l'alimentation du bétail. La demande annuelle totale du bétail est estimée à 67 000 m³ mais le mode de distribution par des abreuvoirs circulaires ouverts, toujours en eau, entraîne une perte par évaporation d'environ 11 000 m³. En outre, d'autres pertes, difficiles à chiffrer se produisent lors du transfert des eaux souterraines des forages vers les réservoirs et des réservoirs vers les abreuvoirs. La capacité des abreuvoirs étant de 12 m³, en estimant à 7 m³ leur recharge hebdomadaire, on a abouti à une quantification approximative des besoins en eau du ranch. Ceux-ci sont estimés à environ 100 000 m³.

Il est possible d'améliorer la gestion des eaux superficielles du ranch en :

- connectant les retenues au réseau de distribution,
- en surcreusant les cuvettes,
- en imperméabilisant le fond des retenues par l'épandage de bentonite.

Afin de tester l'efficacité de ces solutions pour la gestion des eaux du ranch, nous avons défini :

- deux indices caractérisant la retenue,
- cinq indices caractérisant la valorisation des eaux superficielles,
- deux indices d'impacts des retenues sur la recharge des aquifères.

Les simulations du fonctionnement des 5 retenues étudiées montrent tout l'intérêt d'une connexion des *presones* au réseau de distribution. Outre les gains importants associés à la fourniture d'eau sans pompage, un mètre cube d'eau souterraine nécessitant la consommation d'un litre de gasoil, l'utilisation des eaux superficielles est favorable au bilan des nappes d'eaux souterraines. La modification de la géométrie d'une retenue par surcreusement améliore sa capacité de stockage mais également l'indice de satisfaction des besoins d'environ 10 %. Cependant, un surcreusement excessif conduit au maintien d'un certain volume d'eau dans la retenue d'une année sur l'autre, ce qui peut nuire à une bonne répartition des ressources. En imperméabilisant le fond des cuvettes après surcreusement, on améliore encore l'indice de satisfaction des besoins, principalement lors que les *presones* sont connectées au réseau de distribution. Cependant il faudrait réaliser une étude économique pour en apprécier l'utilité.

Par ailleurs, une extension de ce type d'analyse est possible à l'ensemble des *presones* du ranch en examinant cas par cas les possibilités offertes par chacun d'eux. Une simulation de la gestion des eaux superficielles à l'échelle du ranch est possible mais nécessite tout d'abord une estimation des apports superficiels sur toutes les retenues. Pour ce faire, nous pourrions utiliser les outils de transposition développés au chapitre 10.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse, réalisé au Nord-Mexique dans un contexte de climat semi-aride, essaie de répondre à deux questions principales:

- quel est le rôle des petits barrages dans une zone semi-aride apte à l'élevage extensif ?
- Quel est le fonctionnement hydrologique de ces retenues et de leurs bassins versants ?

La zone d'étude est placée dans la partie médiane de la région hydrologique 36 (RH36). Les limites de la RH36 se confondent avec celles des bassins versants endoréiques des rios Nazas et Aguanaval. Sa partie médiane est caractérisée par la transition géologique entre les matériaux éruptifs et sédimentaires et par la transition climatique d'un climat subhumide (précipitation annuelle de 800 mm) au climat aride (200 mm) dans la partie basse des lagunes. Elle est soumise à des précipitations très aléatoires qui rendent l'agriculture pluviale peu rentable. Ces circonstances pluviométriquement défavorables obligent les agriculteurs à se tourner vers des activités plus lucratives comme l'élevage extensif. Diverses stratégies sont mises en place pour assurer l'alimentation en eau du bétail toute l'année. Elles font appel aux eaux superficielles et souterraines.

Le ranch Atotonilco, zone de notre étude, est consacré à l'élevage extensif. Pour alimenter en eau près 4500 têtes de bétail, le ranch est équipé d'un réseau de 69 forages, près de 300 abreuvoirs et 61 petites retenues. Ce système mixte d'exploitation (eau souterraine - eau superficielle) tient compte de la distribution spatiale du bétail dans les enclos sur une superficie totale de 450 km², condition nécessaire pour une bonne gestion des pâturages.

Les observations faites pendant cinq ans sur un réseau de 30 postes pluviométriques répartis dans tout le ranch, pendant trois ans sur 7 bassins versants représentatifs des différents matériaux géologiques, ainsi que sur l'ensemble du système de distribution de l'eau dans le ranch permettent de tirer les enseignements qui suivent.

Concernant la pluviométrie

A l'échelle annuelle, le gradient altitudinal des précipitations est de 40 mm tous les 100 m en année sèche (au-dessous de 427 mm de pluie annuelle) et de 20 mm tous les 100 m en année normale ou légèrement excédentaire. L'analyse des nombres annuels de jours de pluie a montré que ce nombre augmente avec l'altitude à raison de 5 jours tous les 100 m mais avec parmi eux un seul jour supérieur à 5 mm. Ainsi, les parties les plus élevées du ranch semblent favorisées par les pluies

convectives estivales, engendrées par des masses d'air humide en provenance de l'océan Pacifique. Sur le trajet de ces masses d'air, les reliefs du ranch précèdent en effet les parties les plus basses situées au nord du ranch.

L'analyse des hyétogrammes a permis caractériser l'intensité des pluies estivales : le plus souvent, plus de 50 % du total de l'averse tombe pendant l'intensité maximale en 10 mn, plus de 65 % pendant l'intensité maximale en 20 mn et plus de 70 % pendant l'intensité maximale en 30 mn. En outre, 70 % des averses ont l'intensité maximale placée en début d'averse, dans le premier quart de leur durée. La faible probabilité d'avoir deux pluies dans la même journée permet une bonne relation entre l'intensité maximale en 30 mn et la pluie journalière, seule donnée disponible dans la région sur de longues périodes.

L'extension spatiale des averses varie fortement au cours de la saison estivale et la taille d'une cellule pluvieuse varie le plus souvent de quelques km² à plusieurs dizaines de km². Cependant, les averses les plus étendues couvrent largement l'ensemble du ranch. En outre, la zone des reliefs au sud du ranch est influencée principalement par les masses d'air humide provenant de l'océan Pacifique. Par contre, les pluies hivernales, en provenance de l'océan Atlantique, sont plus abondantes au nord du ranch, sur les parties les plus basses, et couvrent de larges superficies avec de faibles intensités. Les caractéristiques spatiales et temporelles très irrégulières des pluies estivales nécessiteraient une analyse plus importante de leurs répartitions avant d'étendre aux bassins versants de taille supérieure à 5 et 10 km² l'usage des relations hydro-pluviométriques établies à l'échelle de bassins versants plus petits.

Concernant l'hydrologie des bassins versants

En 1996, les coefficients annuels d'écoulement des bassins versants sont les plus importants de la période observée (1996-1998). Les bassins versants sur matériaux calcaires ont présenté les coefficients de ruissellement les plus forts (2,7 à 3,4 %), les bassins versants rhyolitiques des valeurs plus faibles (2,1 à 2,3 %) et les bassins versants sur basalte et conglomérats basaltiques des coefficients d'écoulement très faibles (0 à 0,4 %).

L'analyse des relations entre la pluie et la lame ruisselée, sur les parcelles expérimentales et les bassins versants, montre très nettement le rôle de l'intensité des pluies dans la genèse du ruissellement. Au niveau des parcelles, la lame ruisselée est mieux expliquée par l'intensité maximale en 10 minutes ; au niveau des bassins versants, elle s'explique bien par l'intensité maximale de pluie en 30 minutes. Afin de prendre en considération les intensités de pluie dans les relations hydro-pluviométriques, nous avons, dans un premier temps, cherché à utiliser les événements qui ne ruissellent pas et ceux qui ruissellent peu, ce qui nous a permis d'établir une relation exponentielle décroissante entre l'intensité de pluie limite du ruissellement (IL) et un indice des pluies antérieures de type indice de Kholer (IK). Ce seuil limite du ruissellement (IL) pour l'intensité des pluies nous a conduit à définir la pluie utile (PUIL) d'une averse comme le cumul des pluies dont l'intensité

dépasse le seuil IL déterminé par la valeur de IK au début de l'averse. Dans un second temps, nous avons recherché une relation entre la pluie utile et la lame ruisselée. A l'échelle des parcelles expérimentales, d'une superficie de 60 m², cette relation est linéaire. Elle est de type quadratique à l'échelle des bassins versants dont la superficie varie entre 0,1 et 5 km². Nous avons ainsi défini un modèle global déterministe à 5 paramètres : 3 paramètres attachés à la détermination de PUIL et 2 autres paramètres associés au modèle quadratique à l'échelle des bassins versants. A l'échelle des parcelles expérimentales, nous nous sommes inspirés du modèle global de type Girard (1976) en essayant d'y introduire l'intensité pluviométrique. Son introduction améliore nettement, dans la plupart des cas, la relation linéaire entre la lame ruisselée et la pluie utile.

Avec les données collectées sur les parcelles expérimentales, complétées par des observations et des mesures concernant le comportement hydrodynamique des sols, il est possible d'envisager une modélisation hydrologiques spatialisée sur quelques bassins versants du ranch Atotonilco, en particulier ceux de Carboneras, El Viejo et El Muerto mais nous n'avons pas entrepris de recherches dans cette direction, car ils nous semblaient sortir nettement du cadre fixé à cette thèse.

Calage et Validation du modèle

Le calage des paramètres du modèle déterministe quadratique a été réalisé sur l'année 1996 puis validé sur les années 1997 et 1998. La phase de validation nous a permis d'améliorer l'estimation des paramètres E, coefficient de croissance quadratique, et F, constante quadratique. Une meilleure adéquation a été trouvée en faisant dépendre F de l'état d'humectation des sols, c'est-à-dire de l'indice des pluies antérieures IK, et en faisant varier E pour tenir compte en particulier des anomalies du ruissellement des bassins versants lorsque deux averses sont espacées de moins de 24 heures:

- L'analyse de l'ensemble des crues des années 1996, 1997 et 1998 révèle l'importance prise par le ruissellement au début de la saison pluvieuse de l'année 1996. Elle semble due au faible développement du couvert végétal cette année-là, après une année 1995 très sèche et une absence de pluies printanières, alors que l'année 1997 semble précisément caractérisée par un fort développement végétal dès le début de la saison pluvieuse estivale.
- Un comportement particulier a été observé à l'occasion de deux averses successives de plus de 10 mm en moins de 24 heures. La secondeaverse présente alors une meilleure aptitude au ruissellement et cette aptitude varie avec la nature des matériaux géologiques sous-jacents, les matériaux colluviaux ou alluviaux étant les plus sensibles, les matériaux rhyolitiques les moins sensibles à cette succession d'averses.

Pour aller plus loin dans la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, il faudrait chercher à confirmer le rôle du couvert végétal herbacé sur l'aptitude des sols au ruissellement, analyser plus finement les événements qui se succèdent dans de brefs intervalles de temps et effectuer des observations sur l'état d'humectation des sols à certaines époques de la saison des pluies, lorsque ceux-ci commencent à être bien humectés.

Transposition du modèle

En s'appuyant sur une analyse en composantes principales (ACP) des variables descriptives des bassins versants (géologie, relief, sols, végétation) et des paramètres du modèle global quadratique, les règles de transposition de ces paramètres, à l'ensemble des bassins versants de superficie inférieure à 5 km² et équipés de *presones*, ont été établies en utilisant trois critères :

- la géologie comme principal facteur explicatif de l'écoulement,
- la taille du bassin versant,
- les pentes qui caractérisent le relief du bassin.

La transposition des paramètres pour les bassins de taille supérieure à 5 km² n'a pas été définie (6 bassins versants de taille supérieure à 10 km² sont équipés de *presones* dans le ranch Atotonilco). La grande variabilité de la taille des cellules pluvieuses limite en effet l'application du modèle global aux bassins versants de taille inférieure à 5 km². Au-delà, il faudrait faire appel à l'arsenal des analyses géostatistiques pour déterminer des probabilités d'occurrence des différentes formes d'averses avec leurs extensions spatiales.

Extrapolation du modèle

La phase d'extrapolation a permis établir deux importantes relations:

- une relation étroite entre la valeur de la pluie utile PUIL, principale variable explicative du ruissellement dans le modèle quadratique, et l'intensité maximale en 30 minutes ;
- un rapport entre l'intensité maximale en 30 minutes et la pluie journalière qui varie entre 0,5 et 2, avec une distribution des valeurs de ce rapport variable avec la hauteur de pluie journalières, une distribution uniforme au-dessous d'une pluie journalière de 10 mm, des distributions légèrement différentes sur les intervalles 10 à 20 mm et au-dessus de 20 mm.

L'utilisation de ces relations nous a permis de reconstituer 13 années de lames ruisselées sur 3 bassins versants à partir d'une série de 13 années de données pluviométriques journalières disponibles à la station Atotonilco. Cette reconstitution établit que la lame ruisselée de l'année 1996 est supérieure à la valeur médiane. La période de retour d'une année comme celle de 1998 varie entre 3 et 4 ans parmi les années sèches et l'année 1997 apparaît comme celle qui ruisselle le moins de toute la période de reconstitution. Elle aurait donc une période de retour proche de 15 ans dans le meilleur des cas, supérieure à 20 ou 30 ans pour les bassins Pastelero et Carboneras. Nous pourrions étendre la reconstitution d'une série de 13 années d'apports journaliers à d'autres retenues du ranch Atotonilco en utilisant la même procédure. Cependant l'utilisation de telles séries n'est intéressante que pour chaque retenue prise individuellement. Pour analyser la gestion des eaux superficielles à l'échelle du ranch, il faudrait pouvoir reconstituer la variabilité spatiale des pluies à cette même échelle.

Concernant les rôles actuels et potentiels des petites retenues

L'analyse des bilans hydriques des retenues pour les années 1996 et 1997 montre que l'eau superficielle est actuellement très peu utilisée par le bétail. Ainsi, seulement 1,26 % du volume stocké en 1996 et 1997 a servi à l'abreuvement des animaux. La durée de l'eau dans les retenues est elle-même très courte et celles-ci ne peuvent donc servir d'abreuvoir tout au long de l'année. L'alimentation en eau du bétail est donc assurée par un réseau de réservoirs et d'abreuvoirs (environ 280) qui sont remplis à partir de 69 forages équipés de pompes. Cependant, il est possible d'améliorer l'utilisation des eaux superficielles :

- en connectant les retenues au réseau de distribution,
- en surcreusant les cuvettes pour améliorer leur géométrie,
- en imperméabilisant les fonds des cuvettes par l'utilisation de bentonite après surcreusement.

Ces trois possibilités ont été testées sur plusieurs exemples en utilisant des indices caractérisant la retenue, la valorisation de ses eaux et son impact sur la recharge des aquifères. La connexion des retenues au réseau de distribution apparaît comme la solution la plus prometteuse puisqu'elle permet d'importantes économies en carburant utilisé pour l'exhaure des eaux souterraines (1 litre de gasoil pour 1 m³ d'eau). Elle ne peut être préconisée de manière systématique mais une étude économique pourrait être faite aisément pour chaque retenue à partir des renseignements collectés au cours de nos travaux. Le surcreusement et l'imperméabilisation des cuvettes sont des solutions d'autant plus intéressantes que les tâches assignées aux retenues dans la fourniture d'eau sont importantes. Comme la connexion au réseau de distribution, elles ne peuvent cependant être préconisées de manière systématique et des études économiques préliminaires sont nécessaires avant leur mise en œuvre.

A l'échelle du ranch, une étude globale de la gestion des eaux superficielles est possible. Elle requiert au préalable la réalisation des opérations de transposition des modèles hydrologiques sur les années ayant fait l'objet d'observations pluviométriques sur l'ensemble du ranch, en particulier 1996, 1997 et 1998. Une utilisation des données recueillies en 1995 et 1994 est également envisageable. Après quoi il faudrait utiliser un modèle capable de simuler de manière concomitante les différentes solutions adoptées sur un quartier ou plusieurs quartiers du ranch. Sans attendre une étude globale de la gestion des eaux superficielles des essais de connexion et d'imperméabilisation pourraient être entrepris pour tester la faisabilité de nos propositions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBERGEL, J.** (1988). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au Km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Etudes et Thèses, Editions de l'ORSTOM.
- ALBERGEL J.** (1998). Rapport sur les études menée en 1997 sur les bassins versants de Chaffai, les lacs de Baouejer et de Mrira et les barrages de el Aroug et bou Haya. Rappel de quelques résultats antérieurs. ORSTOM, Ministère de l'Agriculture de Tunisie. IRD, Tunis.
- AMBROISE B.** (1991). Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré. Processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du Département « Science du Sol » de l'INRA, Dijon, 26/27-03-1991, 33 p.
- ANAYA E., BARRAL H.** (1995). La ganaderia y su manejo en relacion con los recursos agua y pastizal en la zona semi-arida de Mexico. Folleto Científico No. 5. INIFAP - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 78 p.
- ANAYA E.** (1998). Caracterización y evaluación de la cobertura vegetal en la cuenca del arroyo Ocuila. Folleto Científico No. 10. INIFAP - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 59 p.
- BAIZE** (1988). Guide des analyses courantes en pédologie, INRA, 172 p.
- BARRAL H., I. ORONA y E. ANAYA** (1993). Manejo ganadero en relación con el recurso agua. Dans Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Region Hidrológica 36. Eiteures. Loyer et al. 1993. pp 287-304.
- BOUYOUCOS G. S.** (1927). The hydrometer as a new method for mechanical analysis of soils. J. of Soil Sc. 23, 343.
- BROUSTE L.** (1996). Hydrochimie et géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique). Thèse de Doctorat de l'Universite Paris XI Orsay. N 4645. 227 p.
- CANTU B., J. E.** (1984). Manejo de pastizales (revisión bibliográfica). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad Laguna. Dpto. de producción animal. Torreón Coahuila, México. 213 p.
- CAMUS H, ALBERGEL J., GUIGUEN N. et BEN YOUNES M.** (1995). Note sur l'envasement de lacs collinaires en zone semi-aride tunisienne. ORSTOM. IRD Tunis.
- CASENAVE A. et VALENTIN C.** (1989). Les états de surface de la zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration. Col. Didactique, Editions de l'ORSTOM. Paris. 229 p.

- CHAMAYOU et LEGROS** (1989). Les bases de la science du sol. Techniques vivantes, Presses Universitaires de France, 593 p.
- CHOW V.T.** (1964). Handbook of applied Hydrology. Mc Graw Hill, 1215 p., New York.
- CORNET A.** (1988). Principales caractéristiques climatiques. Dans *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo y agua en la reserva de Mapimí* : 45-76. Instituto de Ecología, México.
- CORRALES R.** (1993). Hacienda Atotonilco. Documento interno. Durango, Dgo. 55 p.
- COTECOCA** (1968). Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana Estado de Durango. Secretaría de Agricultura y Ganadería. 51 p.
- DELHOUME J. P.** (1992). Caractérisation du paramètres pluie : distribution dans le temps et dans l'espace (Réserve de Mapimí). In : Actas del Seminario Mapimí. Eds., Instituto de Ecología de México, ORSTOM, CEMCA, México, D.F., 111-125.
- DELHOUME J. P.** (1995). Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la biosphère de Mapimí, Nord-Mexique). Thèse de doctorat. Université de Poitiers, 300 p.
- DESCROIX L., ESTRADA J. y BOUVIER C** (1993). Hidrometría de la RH36. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 63-117.
- DESCROIX L., ESTRADA J., LOYER y ORONA. C.I.** (1993). Sintesis de la RH36. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 345-367.
- DESCROIX L., NOUVELOT JF. y ESTRADA J.** (1997). Geografia de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. INIFAP ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 52.
- ELSYDE** (1992). Visual, version 2.0 : Logiciel d'exploitation des systèmes Chloe Pluvio Limni. Manuel de l'utilisateur. Electronique Système Développement. 37 p.
- ESTRADA A. J. BOUVIER C. y DECSCROIX L.** (1993). Regimen Pluviométrico de la RH36. In : Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 25-61.
- FAO** (1996). Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage No. 54. CIEH, ORSTOM, Cemagref. FAO, Rome. 244 p.
- GARCIA HERRERA, G.** (1993). Variabilidad de los elementos del clima en la RH36. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 121-142.

- GIRARD G.** (1975). Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoule en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. XII (3), Paris : 189-221.
- GOMEZ GONZALES, G.** (1992). El ejido mexicano: Fracaso, derrota o modernización? (posibilidades y limitantes de la reformas del 27 constitucional). En: Analisis critico de la nueva reforma agraria. Compiladores, Lopez Games et Mata Garcia (1992).
- GONZALEZ BARRIOS J.L.** (1992). Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine : exemple dans la « Comarca Lagunera ».). Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II. 316 p.
- GONZALEZ HITA L., SANCHEZ DIAZ F. y MATA Y.** (1995). Estudio hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera, México. In : Estudios de hidrología isotópica en America Latina sobre recursos hídricos y la contaminación de aguas subterráneas. (Eds. AIEA), TECDOC, 835, Vienna, 237-276.
- GOULD B. W.**, 1961 - Statistical methods for estimating the design capacity of dams - Journal of the Institution of Engineers, Australia, 33 (12), 405-16.
- GRAS R.**, (1994). Sols caillouteux et production végétale. Editions INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). Paris. 175 p.
- HIEZ G.**, (1977). L'homogénéité des données pluviométriques. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XIV, no. 2, 1977, 129-172.
- HIEZ G, et COCHONNEAU J.** (1992). MVR 1.5, la Méthode du Vecteur Régional. Logiciel informatique, ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, Montpellier, France.
- INEGI** (1977). Carta geológica Jesús Agustín Castro G13D64 (escala 1:50000). Dirección general de geografía del territorio nacional. México.
- INEGI** (1978). Carta geológica Doce de Diciembre G13D65 (escala 1:50000). Dirección general de geografía del territorio nacional. México.
- INEGI** (1981). Carta de Uso del Suelo G13-12 (escala 1:250000). Dirección general de geografía del territorio nacional. México.
- INEGI** (1989). Guías para la interpretación de cartografía : geología. Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática, México. 33 p.
- LEDESMA MARES, J.C.** (1992). Las modificaciones al artículo 27 constitucional en el contexto histórico de la crisis agrícola en México (1940-1990). En: Analisis critico de la nueva reforma agraria. Compiladores, Lopez Games et Mata Garcia (1992).
- LOYER J.Y.** (1993). Rocas y Materiales Geológicos de la RH36. In Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 143-160.

- LOYER J.Y. y MORIAUD S.** (1996). Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. Uso y Manejo del Agua en las Cuencas Hidrográficas del Norte de México. Proyecto CENID RASPA y ORSTOM. Folleto Científico No. 6. INIFAP - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 117p.
- LOYER J.Y. et PLENCASAGNE A.** (1996). Note sur la sédimentation dans les presones de Carboneras et El Tullido (ranch Atotonilco, Dgo.). ORSTOM-CENID RASPA INIFAP, Gómez Palacio, Dgo. 5p.
- LOYER J.Y.** (1998). Gestion actuelle et potentielle des eaux superficielles au Nord-Mexique. Cuclo de Conferencias «Laguneros por el Agua». ISTEM, TEC Laguna de Torreón Coah.
- MARTIN ROSALES, W.** (1997). Efectos de los diques de retencion en el borde meridional de la sierra de Gador (Almeria). Tesis Doctoral. Thèse de doctorat. Université de Granada, 266 p.
- MOLLE F, et E. CADIER** (1992). Manual do pequeno açude. Sudene, ORSTOM Tapi. Brasil. 523 p.
- NASH J. E.** (1969). A course of lectures on parametric or analytical hydrology. GreatLackes Institue, University of Toronto, Pr. 38 : Lecture 12.
- NASH J. E. and SUCLIFFE J. V.** (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principale, Journal of Hydrology, 10 : 282-290.
- NOUVELOT J.F.** (1993). Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants raux en Afrique tropicale et équatoriale. ORSTOM - CIEH, 539 p.
- NOUVELOT, J. F. et L. DESCROIX.** (1996). Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. Dans *TRACE Mexico*: 9-25, decembre 1996.
- NOUVELOT, J. F.** (1997). Cuantificacion manejo y uso del recurso hídrico en las cuencas hidrográficas del Norte de México: Ojeteivos, métodos y logros. In 25 Aniversario del CENID RASPA. INIFAP, Gómez Palacio Dgo. 53-70.
- NUÑEZ, H.** (1992). Reformas al 27 y respuesta campesina. In: Analisis critico de la nueva reforma agraria. Compiladores, Lopez Games et Mata Garcia (1992).
- ORONA C. I.** (1993). Caracterizacion socioeconómica de 3a RH36. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 247-272.
- ORSTOM** (1989). HYDROM. Logiciel de banque de données hydrométriques.
- Manuel de l'opérateur, J.F. Boyer, G. Cochonneau, C. Dieulin, N. Rouché. Laboratoire d'hydrologie, IRD, Montpellier. 65 p.
 - Manuel de l'utilisateur, G. Cochonneau. Laboratoire d'hydrologie, IRD, Montpellier. 89 p.

- ORSTOM** (1991). **PLUVIOM** : Logiciel de gestion de données pluviométriques. Eds., Boyer J.F., Crespy A., Dieulin C., Guiscafre J. et Raous P. IRD Laboratoire d'hydrologie, Montpellier. 329 p.
- ORSTOM** (1992). **VISUAL** : Logiciel de gestion de données des pluviographes type OEDIP. ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, Montpellier.
- ORSTOM** (1993). **SAFARHY** : logiciel de fonctions statistiques pour l'hydrologie. ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, Montpellier.
- PAGOT J.** (1985). L'élevage en pays tropicaux. Techniques agricoles et productions tropicales. Editions, G.P. Maissonneuve & Larose, Paris. 526 p.
- PEUGEOT C.** (1995). Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentations in-situ et modélisation. Thèse de Doctorat, Uni. Joseph Fourier, Grenoble 1 : 356 p.
- PIFSV-SARH.** (1991). Estadística de la producción agropecuaria y forestal y su valor de los ciclos otoño-invierno y primavera-verano. SARH subdelegación de la política y concentración, unidad de información y estadística. Cd. Lerdo, Dgo. México, 79 p.
- RIVERA GONZALEZ** (1993). Sistema de topoformas y unidades de suelos. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 175-190.
- RIGAL G.** (1988). Etude du problème de l'irrigation dans une région agricole du centr-nord du Mexique. Institut National Agronomique Paris - Grignon, ORSTM et l'Institut d'écologie du Mexique. Mémoire. 100 p.
- ROCHE M.** (1963). Hydrologie de surface. Office de la recherche scientifique et technique outremer, Paris. Gauthier-Villars Editeur, Paris. 430 p.
- SANTIBAÑEZ** (1992). Ensayo monográfico de la Laguna. Monographie publiée à compte d'auteur. Torreón Coah., Mexique, 240 p.
- SARH** (1977). Servicios de prospección y levantamiento geológico y geofísico en la Región Lagunera de Coahuila-Durango. Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. 8-29.
- SARH** (1980). Pozos profundos. Programa de capacitación permanente. México D.F. 200 p.
- SARH** (1981). Servicios de prospección y levantamiento geológico en la parte sur de la Comarca Lagunera. Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. 32 p.
- TARIN T. G.** (1993). La vegetación natural de la RH36. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 223-244.
- THORNTHWAITE C.W.** (1954). The measurement of potential evapotranspiration, 225 p. Jhon P. Mather Seabrook. New Jersey.
- UNESCO** (1977). Map of the world distribution of arid regions. Explanatory note. MAB technical Notes 7, Unesco, Paris, 1 vol., 54 p.

- VIRAMONTES P. D., LOYER J.Y. y PLENECASSAGNE A.** (1999). Cuencas experimentales en la zona semiarida de la Region Hidrologica 36: estudio de los suelos (rancho Atotonilco). INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 49p.
- VOISIN O. y ORONA C. I.** (1993). Agricultura de Temporal en la RH36. In Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA - ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 273-285.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

	<i>Page</i>
Résumé	3
Remerciements	7
Glossaire	11
Abréviations	13

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE

LE RANCH ATOTONILCO DANS LA REGION HYDROLOGIQUE 36

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA REGION HYDROLOGIQUE 36 (RH36)

1.1. Situation géographique	21
1.2. Description du milieu physique	23
1.2.1. Géologie et géomorphologie	23
1.2.2. Le climat	24
1.2.3. Sols et occupation des sols	29
1.3. Position du ranch Atotonilco dans la RH36	30

CHAPITRE 2 : HYDROLOGIE DE LA RH36

2.1 Les eaux superficielles	31
2.2. Utilisation des eaux superficielles	33
2.2.1 La dérivation des écoulements	33
2.2.2 Le stockage des écoulements	33
2.3. Les eaux souterraines	35
2.4. L'utilisation des eaux souterraines	37
2.5. Bilan hydrologique régional	39
2.6. Conclusion	41

CHAPITRE 3 : L'ADMINISTRATION DE L'EAU DANS LA PARTIE SEMI-ARIDE DE LA RH36

3.1. Historique	43
3.1.1 Propriété et exploitation des terres	43
3.1.2. Population de la RH36	44
3.2. Les différents systèmes d'exploitation et l'utilisation de l'eau	44
3.2.1. Les systèmes d'exploitation agro-pastoraux	44
3.2.2. Les nouvelles stratégies d'exploitation	45
3.3. Exploitation agricole et usage local de l'eau dans la partie semi-aride de la RH36	46
3.3.1. Les systèmes d'exploitation propres à la zone semi-aride	46
3.3.2. L'élevage bovin extensif	47
3.3.3. Perspectives de développement de l'élevage extensif	48
3.4. Conclusion	48

CHAPITRE 4 : LE RANCH ATOTONILCO

4.1. Situation du ranch Atotonilco dans la RH36	49
4.2. Le milieu naturel	50
4.2.1. Climat	50
4.2.2. Géologie et relief	57
4.2.3. Les sols	59
4.2.4. La végétation	61
4.3. Des activités humaines tournées vers l'élevage semi-extensif	62
4.3.1 Activités d'élevage	62
4.3.2 Gestion et usage de l'eau	63
4.4. Conclusion	63

DEUXIEME PARTIE

LES SITES EXPERIMENTAUX : OBSERVATIONS ET DESCRIPTIONS

CHAPITRE 5 : SELECTION ET DESCRIPTION DES SITES EXPERIMENTAUX

5.1. Objectifs	67
5.2. Choix des sites expérimentaux	67
5.2.1. Choix des bassins versants expérimentaux	68
5.2.2. Choix des parcelles expérimentales	68
5.3 Description des bassins	69
5.3.1. Géologie	69
5.3.2. Morphologie	70
5.3.3. Pédologie	74
5.3.4. Végétation	80
5.4. Description des parcelles expérimentales	83
5.5. Conclusion	84

CHAPITRE 6 : OBSERVATIONS CLIMATIQUES

6.1. Les précipitations sur le ranch Atotonilco	85
6.1.1. Le réseau pluviométrique	85
6.1.2. Les données pluviométriques	86
6.1.3. Caractérisation spatiale des pluies	88
6.1.4. Caractéristiques pluviographiques	95
6.2. L'évaporation	98
6.2.1. Mesures effectuées dans le ranch	98
6.2.2. Variations de l'évaporation avec l'altitude	100
6.2.3. Variations saisonnières de l'évaporation	102
6.2.4. Relations entre mesures au bac flottant et mesures au bac classe A	103
6.3. Conclusion	104

CHAPITRE 7 : MESURES HYDROLOGIQUES

7.1. Les données hydrométriques des parcelles expérimentales	107
7.1.1. Protocole expérimental	107
7.1.2. Résultats	109
7.2. Les données hydrométriques des petits barrages	113
7.2.1. Méthodologie	113

	<i>Page</i>
7.2.2 - Dépouillement et qualité des données	118
7.2.3. Les résultats	124
7.3. Conclusion	130

TROISIEME PARTIE

ALIMENTATION EN EAU DES PETITES RETENUES

CHAPITRE 8 : MODELISATION DE LA LAME RUISSELEE

8.1. Variabilité temporelle de l'écoulement superficiel	140
8.1.1. Sur parcelles expérimentales	140
8.1.2. A l'exutoire des bassins versants	146
8.2. Modèles de régression linéaire	151
8.2.1. Principes de la régression multiple	152
8.2.2. Relations obtenues à l'échelle des parcelles expérimentales	153
8.2.3. Relations obtenues à l'échelle des bassins versants	155
8.3. Modèles globaux déterministes	158
8.3.1. Principes	159
8.3.2. Calages à l'échelle des parcelles	162
8.3.3 Calages à l'échelle des bassins versants	164
8.4. Conclusion	165

CHAPITRE 9 : ANALYSE SPATIALE DES DONNEES HYDROLOGIQUES

9.1. A l'échelle des parcelles expérimentales	168
9.1.1 Données hydrologiques et descriptives	168
9.1.2. Résultats de l'ACP	170
9.2. A l'échelle des bassins versants	176
9.2.1. Données hydrologiques et descriptives	176
9.2.2. Résultats de l'ACP	178
9.3. Conclusion.	184

CHAPITRE 10 : VALIDATION, TRANSPOSITION ET SIMULATION

10.1. Validation	188
10.1.1. Validation du paramètre F	190
10.1.2. Validation du paramètre E	191
10.2. Transposition	194
10.2.1. Relations entre paramètres hydrologiques et variables descriptives	194
10.2.3. Les règles de la transposition des paramètres hydrologiques	201
10.3. Extrapolation	203
10.3.1. Relations entre la pluie utile et l'intensité pluviométrique maximale en 30 minutes	203
10.3.2. Relations entre l'intensité pluviométrique maximale en 30 minutes et la pluie moyenne journalière à l'échelle des bassins versants	207
10.3.3. La série des pluies journalières de la station Atotonilco	208
10.3. 4. Relations entre l'altitude et la pluviométrie	209
10.3.5. Extrapolation des écoulements pour la période 1971-1983	211
10.4. Conclusion	214

QUATRIEME PARTIE

LES PETITS BARRAGES DANS LE RANCH ATOTONILCO

CHAPITRE 11 : FONCTIONNEMENT DES PETITS BARRAGES (PRESONES)

11.1 Caractéristiques des réservoirs	219
11.1.1. Principes de construction des petits barrages	219
11.1.2. Géométrie des petits barrages, typologie des <i>presones</i>	221
11.2 Variation du stock d'eau dans les retenues	224
11.3 Bilan hydrique des réservoirs	228
11.3.1. Calcul du bilan	228
11.3.2. Résultats	230
11.4 Les mécanismes de l'infiltration dans les retenues d'eau	234
11.4.1. Mesures directes	234
11.4.2. Analyse des lames infiltrées en fonction des hauteurs d'eau	235
11.4.3. L'infiltration dans les retenues et la recharge des aquifères	240
11.5 Conclusion	242

CHAPITRE 12 : LA GESTION DE L'EAU DANS LE RANCH ATOTONILCO

12.1. Un système de production orienté vers l'élevage extensif	243
12.1.1. Contexte historique	243
12.1.2. Conditions favorables à la production de l'élevage	244
12.2. Les pâturages comme facteur limitant principal	244
12.2.1. La production pastorale du ranch	244
12.2.2. La distribution spatiale du bétail pour mieux gérer les pâturages	245
12.3. L'eau souterraine comme source principale d'abreuvement	247
12.4. Les instruments techniques de gestion de l'eau souterraine	249
12.4.1. Les puits	249
12.4.2. Les réservoirs de stockage (<i>pilas</i> et abreuvoirs)	250
12.4.3. Connexion entre forages, réservoirs et abreuvoirs	255
12.4.4. Utilisation des sources	255
12.4.5. Utilisation des eaux superficielles	257
12.4.6. Stratégie de gestion de l'eau	259
12.5. Conclusion	260

CHAPITRE 13 : PERSPECTIVES D'UTILISATION DES PETITS BARRAGES

13.1. Rappels des diagnostics et définition des objectifs de gestion	261
13.1.1. Estimation des bilans au niveau du ranch	261
13.1.2. Les objectifs de gestion et les échelles de raisonnement	262
13.1.3. Orientations de gestion et indicateurs de performance	263
13.2. Connexion des <i>presones</i> au réseau de distribution	267
13.2.1. L'intérêt et les difficultés de l'opération	267
13.2.2. Exemple des <i>presones</i> étudiés	268
13.3. Modification de la géométrie des retenues d'eau	276
13.3.1. <i>Presón Carboneras</i>	276
13.3.2. <i>Presón El Viejo</i>	279

	<i>Page</i>
13.4. Imperméabilisation du fond des retenues	282
13.4.1. <i>Presón Carboneras</i>	283
13.4.2. <i>Presón El Viejo</i>	284
13.5. Conclusion	287
 CONCLUSION GENERALE	 289
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 297
 TABLE DES MATIERES	 303
LISTE DES FIGURES	309
LISTE DES TABLEAUX	314
 ANNEXES	 319

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE : LE RANCH ATOTONILCO DANS LA REGION HYDROLOGIQUE 36

Page

CHAPITRE 1 : Présentation de la Région Hydrologique 36 (RH36)

Figure 1.1. Localisation de la RH36.	21
Figure 1.2. Géologie de la RH36.	22
Figure 1.3. Coupe géologique de la RH36 (Loyer 1993).	23
Figure 1.4. Climatologie du Mexique.	25
Figure 1.5. Pluviométrie de la RH36.	26
Figure 1.6. Distribution mensuelle des précipitations en pourcentages du total annuel.	27

CHAPITRE 2 : Hydrologie de la RH36

Figure 2.1. Réseau hydrographique de la RH36.	32
Figure 2.2. Les villes et barrages les plus importants de la RH36.	34
Figure 2.3. Coupe géologique schématique du bassin endoréique de la Comarca Lagunera (Brouste 1996).	36
Figure 2.4. Evolution du nombre des puits dans la partie basse de la RH36.	38
Figure 2.5. Evolution du niveau statique de la nappe phréatique en fonction du temps dans la Comarca Lagunera.	38
Figure 2.6. Bilan hydrique de la RH36.	39
Figure 2.7. Les trois zones hydro-climatiques homogènes de la RH36.	40

CHAPITRE 4 : Le Ranch Atotonilco

Figure 4.1. Localisation du ranch Atotonilco.	50
Figure 4.2. Températures moyennes mensuelles des stations Atotonilco et Cuencame.	51
Figure 4.3. Températures maximales et minimales absolues aux stations Atotonilco (A) et Cuencame (B) pour l'année 1978.	51
Figure 4.4. Ecart (A) et écarts cumulés (B) des précipitations annuelles par rapport à la moyenne.	53
Figure 4.5. Ajustement d'une loi statistique aux pluies annuelles de la station Atotonilco.	54
Figure 4.6. Ajustement d'une loi statistique aux pluies journalières maximales annuelles de la station tottonilco.	55
Figure 4.7. Distribution mensuelle des pluies à la station Atotonilco.	56
Figure 4.8. Répartition du pourcentage du nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur de la précipitation journalière (Nouvelot et Descroix 1997).	57
Figure 4.9. Géologie du ranch.	58
Figure 4.10. Relief du ranch.	59
Figure 4.11. Occupation du sol sur l'ensemble du ranch.	61

DEUXIEME PARTIE : LES SITES EXPERIMENTAUX : OBSERVATIONS ET DESCRIPTIONS**CHAPITRE 5 : Sélection et description des sites expérimentaux**

	<i>Page</i>
Figure 5.1. Morphologie collinaire du bassin versant <i>El Molino</i> .	72
Figure 5.2. Morphologie du bassin versant de <i>Carboneras</i> , caractéristique des zones de “ reliefs ”.	73
Figure 5.2 (bis). Morphologie du bassin versant de <i>Carboneras</i> , caractéristique des zones de “ reliefs ”, coupe A B.	74
Figure 5.3. Triangle de texture des sols des bassins versants en considérant les 10 premiers centimètres de profondeur (A) et le sol total (B).	77
Figure 5.4. Carte pédologique du bassin versant <i>Carboneras</i> .	79
Figure 5.5. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant <i>Carboneras</i> .	82

CHAPITRE 6 : Observations climatiques

Figure 6.1. Distribution du réseau pluviométrique dans la zone d'étude	87
Figure 6.2. Relation Altitude-Hauteur annuelle précipitée dans la zone du ranch.	88
Figure 6.3. Répartition spatiale de la pluie à l'intérieur du ranch pour les années 1994 et 1995.	91
Figure 6.4. Répartition spatiale de la pluie à l'intérieur du ranch pour les années 1996 et 1997.	92
Figure 6.5. Isohyètes des pluies journalières du 01/06/96 (A) et 18/09/96 (B).	94
Figure 6.5. Isohyètes des pluies journalières du 03/10/1996 (C).	95
Figure 6.6. Intensités maximales au pas de temps de 10 minutes en fonction de la hauteur totale de l'averse à la station pluviographique <i>Carboneras</i> .	96
Figure 6.7. Relation altitudinale de l'évaporation sur bacs classe A	100
Figure 6.8. Variations de l'évaporation saisonnière moyenne avec l'altitude.	101
Figure 6.9. Moyennes mensuelles de l'évaporation journalière sur bac classe A aux quatre stations du ranch <i>Atotonilco</i> (A 1996 et B 1997).	102
Figure 6.10. Relations entre l'évaporation au Bac classe A et l'évaporation sur Bac flottant pour la période d'observation.	104

CHAPITRE 7 : Mesures hydrologiques

Figure 7.1. Schéma descriptif du dispositif des parcelles.	108
Figure 7.2. Evolution de la lame ruisselée cumulée en fonction du temps sur les parcelles.	110
Figure 7.3. Concentrations et pluviométrie sur les parcelles des sites <i>Carboneras</i> (A) et <i>El Viejo</i> (B) au cours de l'année 1996.	111
Figure 7.4. Humidité du sol et précipitations sur les parcelles de <i>Carboneras</i> .	112
Figure 7.5. Topographie de la retenue de <i>Carboneras</i> pour l'année 1996 (nivellement de mars 1996).	116
Figure 7.6. Topographie de la retenue de <i>Carboneras</i> pour l'année 1997 (nivellement effectué en mars 1997).	118
Figure 7.7. Courbes cotes-surfaces et cotes-volumes de la retenue <i>Carboneras</i> pour les années 1996 et 1997.	119

Figure 7.8. Décroissance du plan d'eau de Carboneras entre le 2 octobre 1996 et le 1 ^{er} décembre 1997.	121
Figure 7.9. Répartition de la pluviométrie annuelle en fonction de l'altitude sur le ranch Atotonilco pour les années 1996 et 1997 en comparaison avec les valeurs caractéristiques de la série observée à la station Atotonilco sur la période 1926-1995.	126
Figure 7.10. Représentation graphique des caractéristiques de la pluie et de la crue à tendance unitaire (FAO 1996).	129

TROISIEME PARTIE : ALIMENTATION EN EAU DES PETITES RETENUES

CHAPITRE 8 : Modélisation de la lame ruisselée

Figure 8.1. Lames ruisselées cumulées en fonction des précipitations efficaces cumulées sur les parcelles expérimentales du bassin versant de Carboneras.	140
Figure 8.2. Intensités pluviométriques en 10 minutes en fonction de l'indice de Kholer ($\alpha=0,1$) pour les averses avec et sans écoulement sur la parcelle 1 (Carboneras).	145
Figure 8.3. Lames ruisselées cumulées en fonction des précipitations efficaces cumulées sur les bassins versants de Carboneras, El Muerto, Pastelero, El Tullido et El Viejo.	147
Figure 8.4. Comportement parabolique de la courbe de la lame ruisselée en fonction de la pluie moyenne sur le bassins versant de El Viejo.	148
Figure 8.5. Intensités pluviométriques maximales au pas de temps de 30 minutes en fonction de IK ($\alpha=0,1$) pour les averses avec et sans écoulement sur le bassin versant de Carboneras.	150
Figure 8.6. Relation entre l'intensité limite de ruissellement au pas de temps 10 mn et l'indice d'humectation des sols sur la parcelle 3 du bassin El Viejo.	159
Figure 8.7. Modèle global linéaire permettant de calculer la lame ruisselée (L_r) à partir de la pluie utile (PUIL) sur le parcelle 3 du bassin versant El Viejo.	160
Figure 8.8. Relation entre le rapport $L_r / (PUIL - B)$ et l'intensité pluviométrique maximale sur le pas de temps 10 mn (I_{max}) pour la parcelle 3 du bassin versant El Viejo.	161

CHAPITRE 9 : Analyse spatiale des données hydrologiques

Figure 9.1. Corrélation entre les pentes moyennes de l'écoulement du modèle linéaire de type Girard (A) et du modèle linéaire à pente variable (C) pour $I_{max} = 50$ mm/h.	169
Figure 9.2. Représentation des variables sur le plan des axes 1 et 2 (A) et 1 et 3 (B).	172
Figure 9.3. Représentation des variables caractéristiques des bassins versants sur le plan des axes 1 et 2 (A) et 1 et 3 (B).	180
Figure 9.4. Relation entre le paramètre E, associé à la variable PUIL dans le modèle déterministe quadratique, et le coefficient annuel d'écoulement des bassins versants.	182

CHAPITRE 10 : Validation, transposition et simulation

Figure 10.1. Relations entre la lame ruisselée (Lr) et la pluie utile (PUIL) sur le bassin versant El Viejo.	189
Figure 10.2. Localisation des retenues et bassins versants dans le ranch Atotonilco.	198
Figure 10.3. Relations entre la pluie utile et l'intensité maximale de pluie en 30 mn.	206
Figure 10.4. Relations entre l'intensité maximale de pluie en 30 mn et la pluie moyenne sur le bassin versant El Viejo.	207
Figure 10.5. Nombre de jours de pluie en fonction de l'altitude dans le ranch Atotonilco.	210
Figure 10.6. Relations entre le nombre de jours de pluie supérieure à 5 mm et l'altitude.	211

QUATRIEME PARTIE : LES PETITS BARRAGES DANS LE RANCH ATOTONILCO**CHAPITRE 11 : Fonctionnement des petits barrages (presones)**

Figure 11.1. Localisation des <i>presones</i> dans le ranch Atotonilco.	220
Figure 11.2. Courbes cotes-volumes des <i>presones</i> étudiés.	221
Figure 11.3. Courbes cotes /surfaces du miroir et surfaces mouillées des <i>presones</i> El Viejo et Carboneras.	222
Figure 11.4. (A). Relations entre les cotes-volumes et cotes-sommes des surfaces exposées à l'air et en contact avec le sol pour les <i>presones</i> de El Viejo et Pastelero.	223
Figure 11.4. (B). Relations entre cotes-indices géométriques IG pour les 7 <i>presones</i>	223
Figure 11.5. Chroniques des cotes moyennes journalières sur 5 <i>presones</i> du ranch Atotonilco	225
Figure 11.6. Chroniques des cotes moyennes journalières observées et calculées à partir des moyennes mobiles, pour le <i>presón</i> Carboneras.	226
Figure 11.7. Histogrammes des volumes moyens hebdomadaires stockés dans cinq retenues du ranch.	227
Figure 11.8. Valeurs moyennes de l'infiltration et l'évaporation de 5 jours d'observations sur les retenues de El Viejo (A) et Pastelero (B).	231
Figure 11.9. Infiltrations dans les retenues de Carboneras et El Viejo en fonction des hauteurs d'eau pendant la saison de pluies.	236
Figure 11.10. Infiltrations dans les retenues de Carboneras, El Tullido et El Muerto en fonction des hauteurs d'eau pendant les saisons sèches des années 1996 et 1997.	238
Figure 11.11. Infiltrations dans la retenue de El Viejo en fonction des hauteurs d'eau pendant les saisons sèches des années 1996 et 1997.	239
Figure 11.12. Comparaison des vitesses d'infiltration entre <i>presones</i> .	239
Figure 11.13. Evolution des niveaux piézométriques de 4 forages dans le ranch.	241

CHAPITRE 12 : La gestion de l'eau dans le ranch Atotonilco

Figure 12.1. Localisation des zones d'embaquement du bétail dans le ranch Atotonilco.	246
Figure 12.2. Profondeur des aquifères dans le ranch à partir des données de 25 forages.	248
Figure 12.3. Localisation des sources, puits et ses equipments.	252
Figure 12.4. Distribution des réservoirs et abreuvoirs dans le ranch Atotonilco.	254
Figure 12.5. Réseau de distribution de l'eau dans le ranch Atotonilco.	256

CHAPITRE 13 : Perspectives d'utilisation des petits barrages

Figure 13.1. Evolution des niveaux phréatiques sur la période 1971-1980.	262
Figure 13.2. Réseau de distribution de l'eau sur lequel peuvent être connectés les <i>presones</i> Carboneras et El Muerto.	269
Figure 13.3. Réseau de distribution de l'eau sur lequel peut être connecté le <i>presón</i> de Pastelero	272
Figure 13.4. Réseau de distribution de l'eau sur lequel peut être connecté le <i>presón</i> de El Viejo	273
Figure 13.5. Courbes hauteurs-volumes et hauteurs-superficies du <i>presón</i> Carboneras avant et après le changement de forme de la retenue.	277
Figure 13.6. Evolution des niveaux d'eau de la retenue Carboneras en 1996 (A) et en 1997 (B) avant et après modification e la géométrie de la cuvette.	278
Figure 13.7. Courbes hauteurs-volumes et hauteurs-superficies du <i>presón</i> El Viejo avant et après le changement de forme de la retenue.	280
Figure 13.8. Evolution des niveaux d'eau de la retenue El Viejo en 1996 (A) et en 1997 (B) avant et après modification e la géométrie de la cuvette.	281
Figure 13.9. Variation des niveaux d'eau dans la retenue Carboneras après modification de la géométrie et imperméabilisation de la cuvette.	284
Figure 13.10.A. Variation des niveaux d'eau dans la retenue El Viejo en 1996 après modification de la géométrie et imperméabilisation de la cuvette.	285
Figure 13.10.B. Variation des niveaux d'eau dans la retenue El Viejo en 1997 après modification de la géométrie et imperméabilisation de la cuvette.	286

LISTE DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE : LE RANCH ATOTONILCO DANS LA REGION HYDROLOGIQUE 36

Page

CHAPITRE 1 : *Présentation de la Région Hydrologique 36 (RH36)*

Tableau 1.1. Capacité au champ et profondeur moyenne des unités de sol dans la RH36.	29
Tableau 1.2. Distribution des principaux groupements végétaux de la RH36 (Tarin 1993).	30

CHAPITRE 4 : *Le Ranch Atotonilco*

Tableau 4.1. Evaporation moyenne journalière en mm, maxima et minima mensuels à la station de Atotonilco sur la période 1969-1983 et 1996-1997.	52
Tableau 4.2. Principales caractéristiques statistiques des pluies à la station Atotonilco (1927-1997).	53
Tableau 4.3. Pluies annuelles et pluies maximales journalières annuelles à la station Atotonilco pour différentes périodes de retour.	55

DEUXIEME PARTIE : LES SITES EXPERIMENTAUX : OBSERVATIONS ET DESCRIPTIONS

CHAPITRE 5 : *Sélection et description des sites expérimentaux*

Tableau 5.1. Pourcentages de recouvrement des formations géologiques sur les bassins.	69
Tableau 5.2. Pourcentages de recouvrement des formes de relief.	70
Tableau 5.3. Profondeur et encroûtement des sols sur les bassins versants.	76
Tableau 5.4. Texture et pierrosité en pourcentages de la superficie des bassins versants.	78
Tableau 5.5. Pourcentages de recouvrement des associations végétales par bassin versant.	81
Tableau 5.6. Taux de recouvrement de la végétation au niveau du sol par bassin versant.	81
Tableau 5.7. Caractéristiques des parcelles expérimentales.	83

CHAPITRE 6 : *Observations climatiques*

Tableau 6.1. Pluies annuelles en mm à la station Atotonilco sur la période 1994 à 1998.	86
Tableau 6.2. Pluies mensuelles à la station Atotonilco sur la période 1994 à 1998.	89
Tableau 6.3. Surfaces couvertes dans le ranch Atotonilco par les tranches pluviométriques annuelles de 50 mm comprises entre les totaux annuels 100 et 600 mm.	90
Tableau 6.4. Surfaces occupées dans le ranch Atotonilco par les trois événements du 01/06, 18/09 et 03/10/1996, découpés en classes de hauteur pluviométrique croissante.	93

Tableau 6.5. Décomposition en trois parties des hyétogrammes observés à la station pluviographique de Carboneras pour l'année 1996.	97
Tableau 6.6. Nombre d'averses par classe de durée, en fonction de la position de l'intensité maximale à la station Carboneras pour l'année 1996.	98
Tableau 6.7. Evaporations journalières moyennes mensuelles dans le ranch Atotonilco.	100

CHAPITRE 7 : Mesures hydrologiques

Tableau 7.1. Tableau des mesures obtenues sur les parcelles de El Viejo et de Carboneras en 1996.	109
Tableau 7.2. Barèmes des relations cotes-surfaces et cotes-volumes de la retenue Carboneras pour les années 1996 et 1997.	116
Tableau 7.3. Equations utilisées pour calculer l'évaporation des retenues.	119
Tableau 7.4. Exemple de calcul des débits ruisselés en amont de la retenue du barrage de Carboneras pour la crue du 07/08/1996.	122
Tableau 7.5. Volumes et poids des sédiments dans 5 retenues pour l'année 1996.	124
Tableau 7.6. Hyétogrammes centrés à la station pluviographique de Carboneras pour l'année 1996.	125
Tableau 7.7. Précipitations et ruissellements sur les bassins expérimentaux du ranch Atotonilco en 1996 et 1997.	127
Tableau 7.8. Valeurs caractéristiques des crues du bassin versant de Carboneras pour l'année 1996.	128

TROISIEME PARTIE : ALIMENTATION EN EAU DES PETITES RETENUES

CHAPITRE 8 : Modélisation de la lame ruisselée

Tableau 8.1. Données pluviométriques et hydrométriques collectées sur les parcelles expérimentales de El Viejo.	141
Tableau 8.2. Données pluviométriques et hydrométriques collectées sur les parcelles expérimentales de Carboneras.	142
Tableau 8.3. Coefficients de corrélation linéaire simple entre lames ruisselées sur les parcelles expérimentales du bassin El Viejo et différents indices de Kholer ($\alpha = 0,1$ à $0,7$).	143
Tableau 8.4. Coefficients de corrélation linéaire simple entre lames ruisselées sur les parcelles expérimentales du bassin Carboneras et les intensités maximales de pluies sur le pas de temps de 5 à 90 minutes.	144
Tableau 8.5. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les lames ruisselées sur les parcelles expérimentales du bassin Carboneras, la pluie utile pour différents seuils d'intensité et la pluie totale.	146
Tableau 8.6. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées sur les bassins versants et différents indices de Kholer ($\alpha = 0,1$ à $0,7$).	148
Tableau 8.7. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées sur les bassins versants et différentes intensités maximales de pluie sur ces mêmes bassins pour des pas de temps compris entre 5 et 90 minutes.	149

	<i>Page</i>
Tableau 8.8. Coefficients de corrélation linéaire simple entre les racines carrées des lames ruisselées sur les bassins versants, la pluie utile pour différents seuils d'intensité et la pluie totale.	151
Tableau 8.9. Données de base relatives à l'ajustement des modèles de régression linéaire multiple pour les parcelles expérimentales.	153
Tableau 8.10. Constantes et coefficient du modèle de régression linéaire multiple pour les bassins versants.	156
Tableau 8.11. Valeurs des paramètres des modèles globaux déterministes sur les parcelles expérimentales.	163
Tableau 8.12. Valeurs des paramètres des modèles globaux déterministes appliqués aux bassins versants.	164
CHAPITRE 9 : Analyse spatiale des données hydrologiques	
Tableau 9.1. Coefficients de corrélation des variables par rapport aux axes principaux de l'ACP.	171
Tableau 9.2. Coefficients de corrélation des variables des bassins versants par rapport aux axes principaux de l'ACP.	178
CHAPITRE 10 : Validation, transposition et simulation	
Tableau 10.1. Données de base pour le calage du modèle global quadratique sur le bassin versant El Viejo.	190
Tableau 10.2 : Valeurs du coefficient de croissance quadratique E pour les crues non précédées par une averse la veille et dont la lame ruisselée est supérieure à 0,5 mm.	192
Tableau 10.3. Valeurs du coefficient de croissance quadratique E pour les crues précédées par une averse de plus de 10 mm depuis moins de 24 heures.	193
Tableau 10.4. Valeurs du paramètre E de croissance quadratique exprimées en $\text{mm}^{-1/2}$.	195
Tableau 10.5. Dénombrement des bassins versants équipés de <i>presones</i> par classe de superficie, par type de formation géologique, classe de pente et type de formation végétale.	200
Tableau 10.6. Dénombrement des bassins versants équipés de <i>presones</i> par croisement des classifications géologiques et topographiques.	200
Tableau 10.7. Pluies mensuelles observées à la station Atotonilco.	209
Tableau 10.8. Nombre de jours de pluie dans le ranch Atotonilco.	210
Tableau 10.9. Différences d'altitude entre la station Atotonilco et les bassins versants expérimentaux, extrapolation des séries de pluies journalières.	212
Tableau 10.10. Répartition en pourcentages des valeurs du rapport entre l'intensité maximale pluviométrique en 30 mn (I_{max}) et la pluie journalière (P_j) sur les bassins versants.	212
Tableau 10.11. Lames ruisselées reconstituées (période 1971-1983) et lames ruisselées observées (période 1996-1998) sur les bassins versants El Muerto, Carboneras et Pastelero.	213

QUATRIEME PARTIE : LES PETITS BARRAGES DANS LE RANCH ATOTONILCO

CHAPITRE 11 : *Fonctionnement des petits barrages (presones)*

Tableau 11.1. Caractéristiques géométriques des <i>presones</i> .	223
Tableau 11.2. Consommation en eau par <i>presón</i> .	230
Tableau 11.3. Bilan des volumes d'eau pendant les saisons des pluies 1996 et 1997.	234
Tableau 11.4. Infiltration limite constante, en mm/jour, sous une charge de 10 cm d'eau, dans les cuvettes des <i>presones</i> .	235

CHAPITRE 13 : *Perspectives d'utilisation des petits barrages*

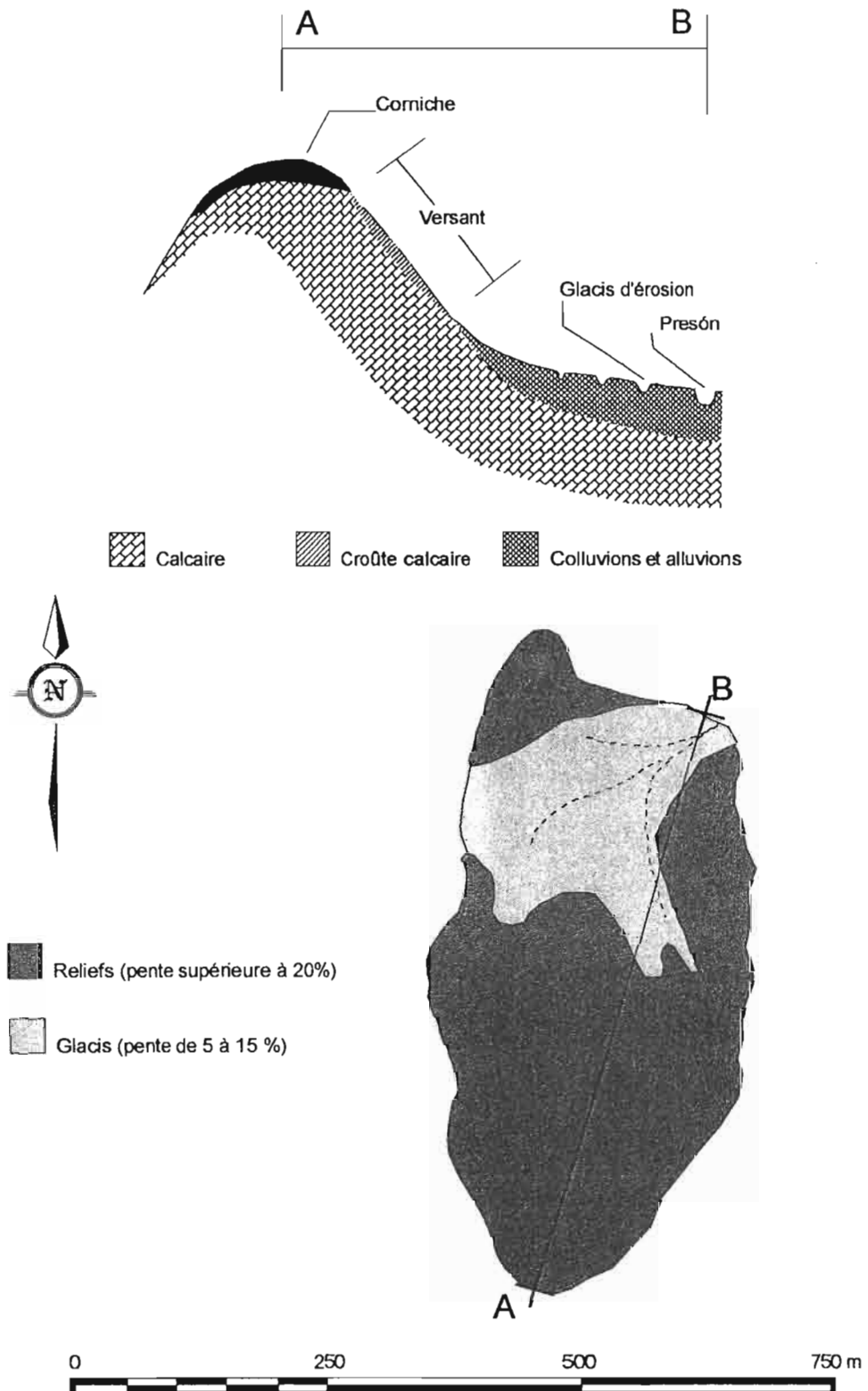
Tableau 13.1. Indices initiaux de caractérisation des retenues et de l'usage de l'eau superficielle.	266
Tableau 13.2. Bilan de la dérivation des eaux du <i>presón</i> Carboneras.	270
Tableau 13.3. Bilan de la dérivation des eaux du <i>presón</i> El Muerto.	270
Tableau 13.4. Bilan de la dérivation des eaux du <i>presón</i> Pastelero.	272
Tableau 13.5. Bilan de la dérivation des eaux du <i>presón</i> El Tullido.	273
Tableau 13.6. Bilan d'eau du <i>presón</i> El Viejo après connexion.	274
Tableau 13.7. Comparaison des indices de valorisation de l'eau des retenues avant et après connexion au réseau de distribution.	274
Tableau 13.8. Bilan d'eau de la retenue Carboneras après modification de la géométrie de la cuvette.	278
Tableau 13.9. Bilan d'eau de la retenue El Viejo après modification de la géométrie de la cuvette.	280
Tableau 13.10. Indices de caractérisation des retenues, de valorisation des eaux stockées et d'impact sur le bilan des nappes avant et après modification de la des cuvettes des <i>presones</i> Carboneras et El Viejo.	282
Tableau 13.11. Bilan d'eau dans la retenue Carboneras après modification géométrique et imperméabilisation de la cuvette.	283
Tableau 13.12. Bilan d'eau dans la retenue El Viejo après modification géométrique et imperméabilisation de la cuvette.	285
Tableau 13.13. Indices de valorisation des eaux après modification de la géométrie et imperméabilisation des retenues Carboneras et El Viejo.	286

ANNEXES

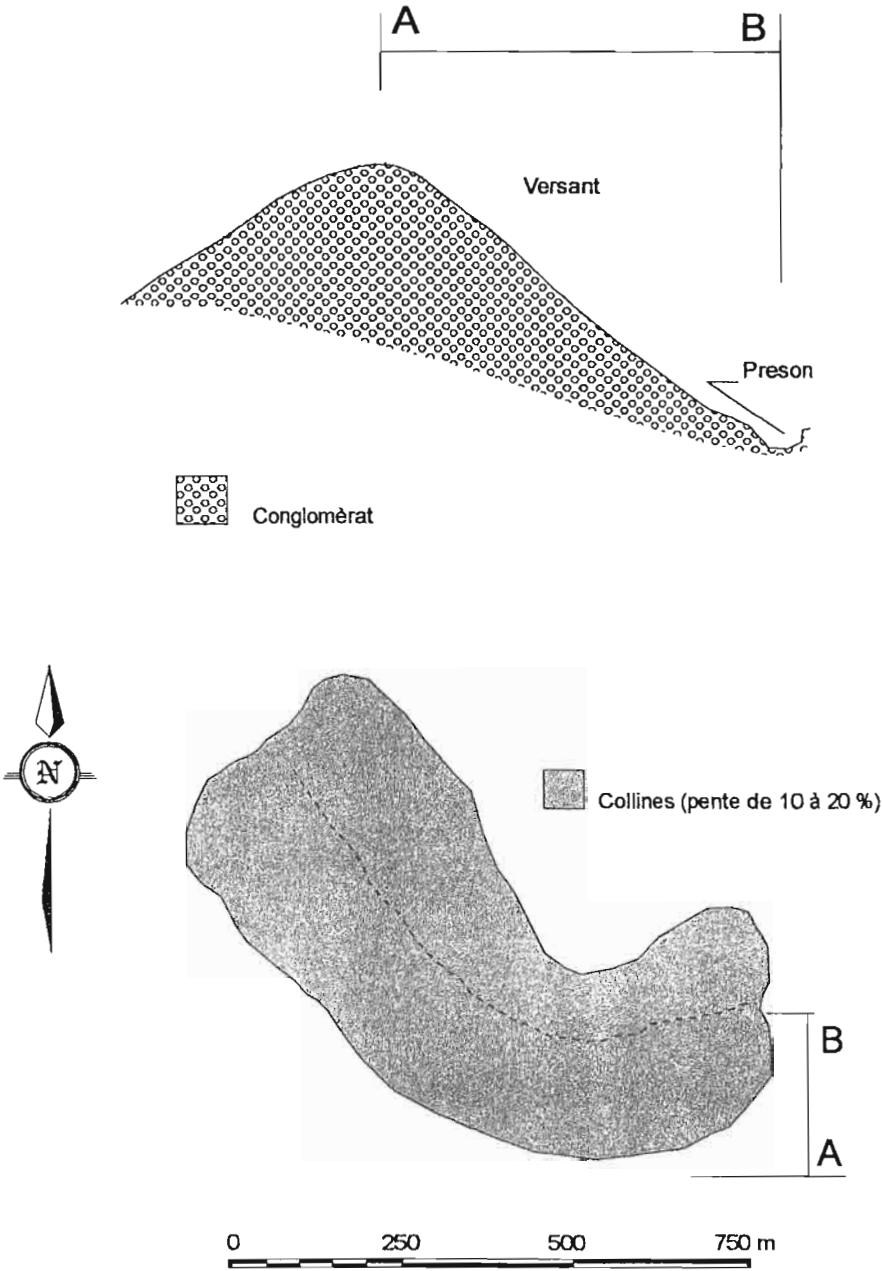
ANNEXES DU CHAPITRE 5

Morphologie des bassins versants	: V.1.1. à V.1.5.
Pédologie des bassins versants	: V.2.1. à V.2.6.
Végétation des bassins versants	: V.3.1. à V.3.6.

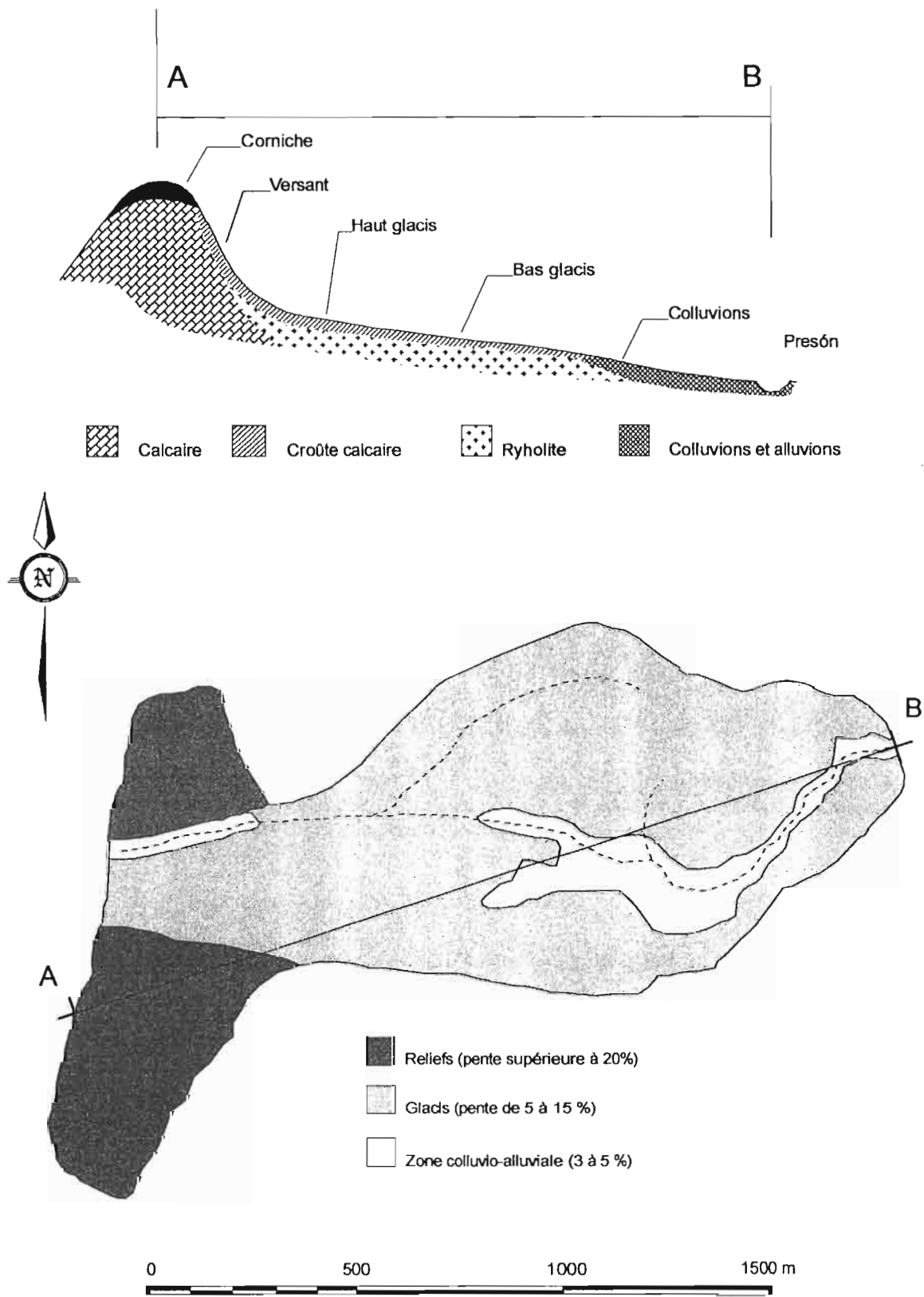
Annexe V.1.1. Morphologie du bassin versant El Muerto.



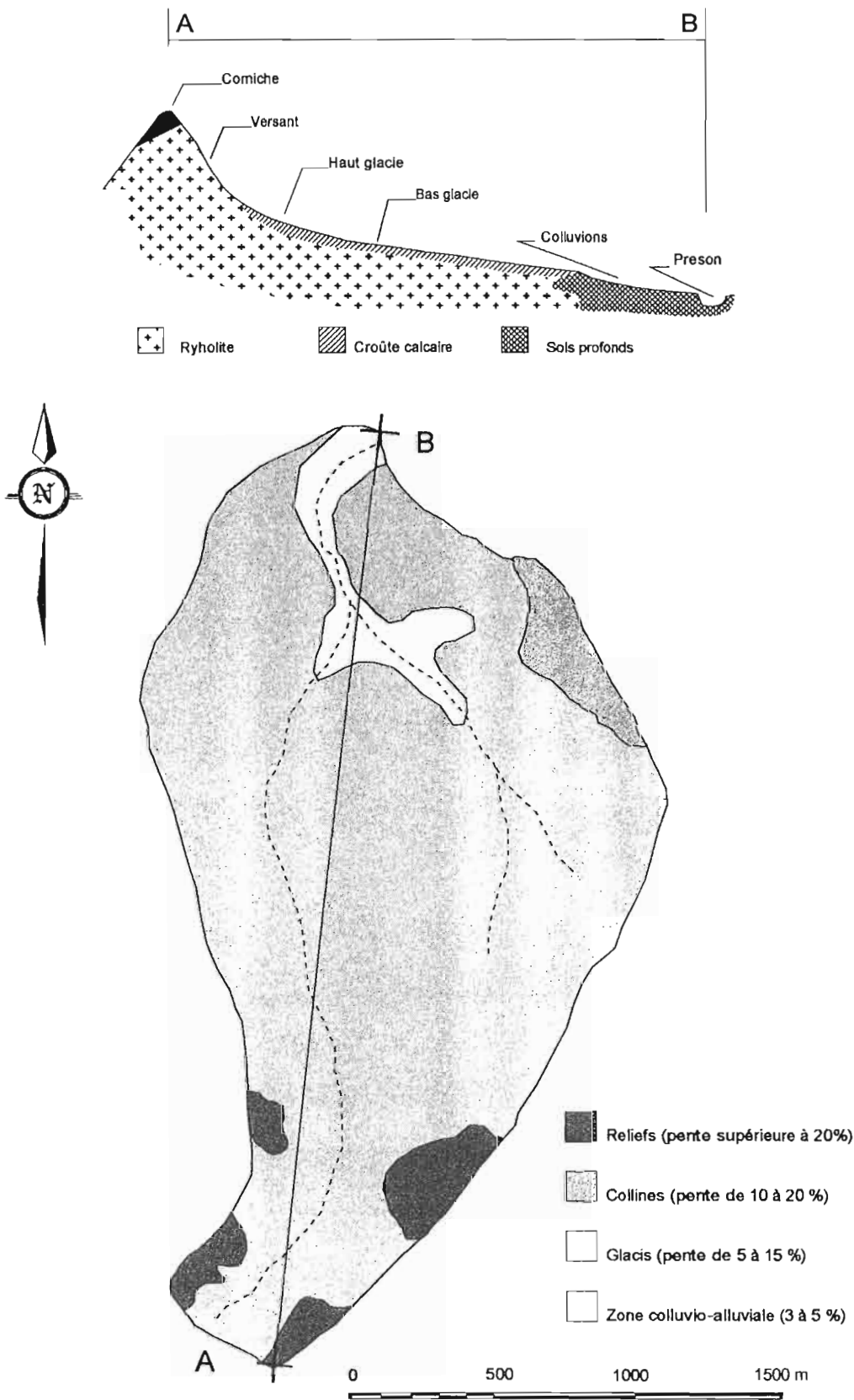
Annexe V.1.2. Morphologie du bassin versant Oso Negro.



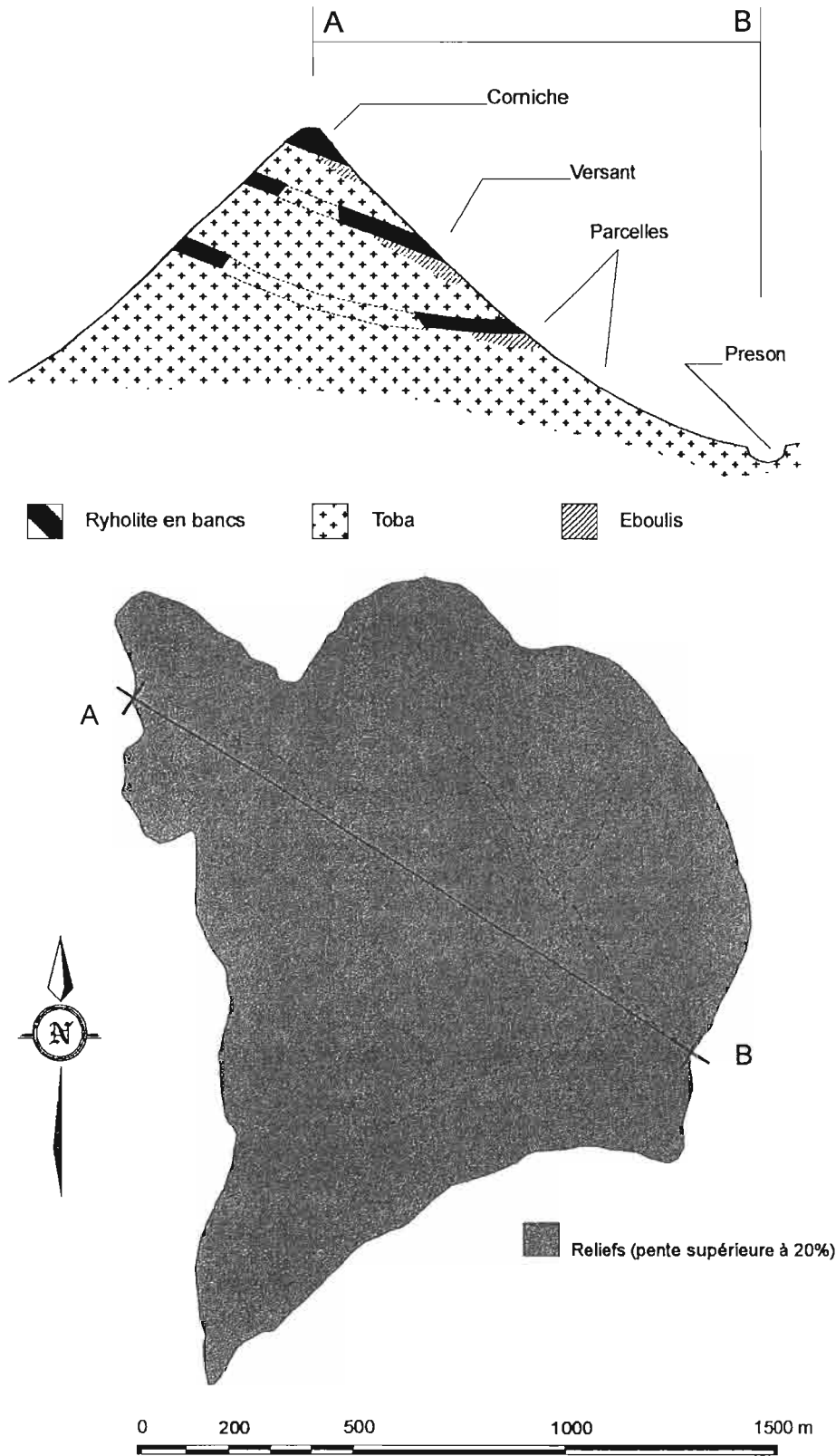
Annexe V.1.3. Morphologie du bassin versant Pastelero.



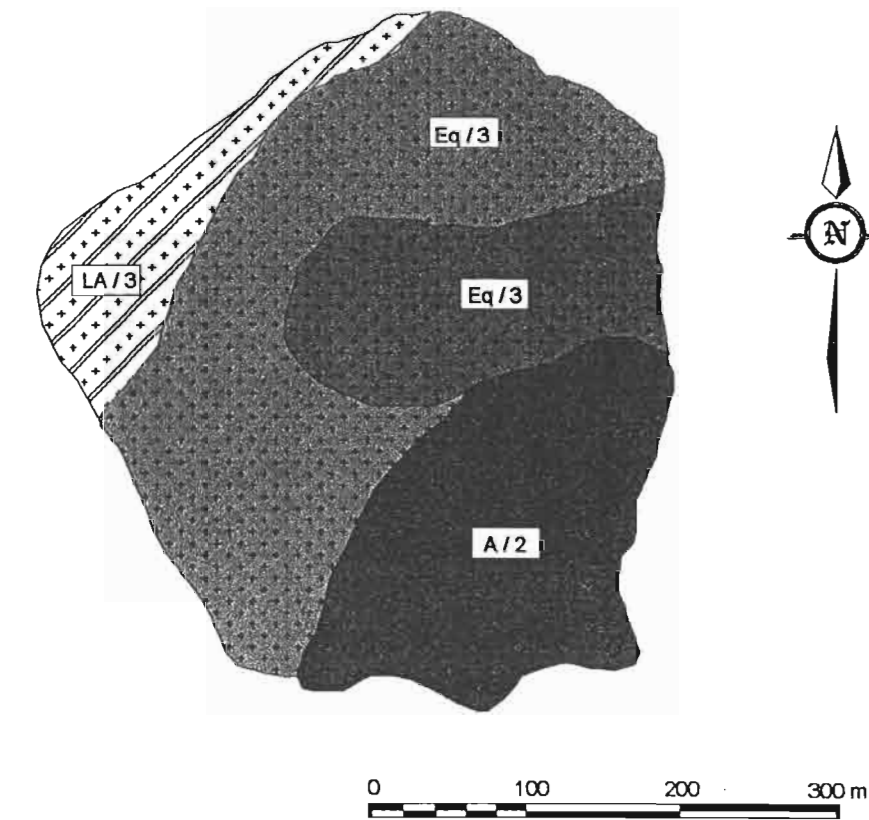
Annexe V.1.4. Morphologie du bassin versant El Tullido.



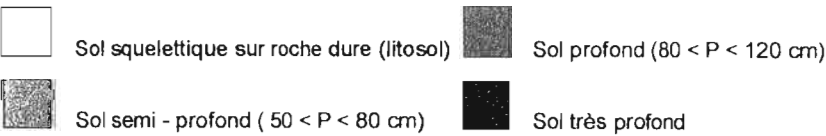
Annexe V.1.5. Morphologie du bassin versant El Viejo.



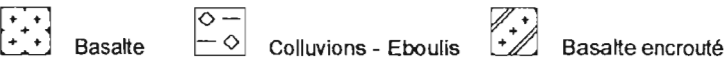
Annexe V.2.1. Carte pédologique du bassin versant El Molino



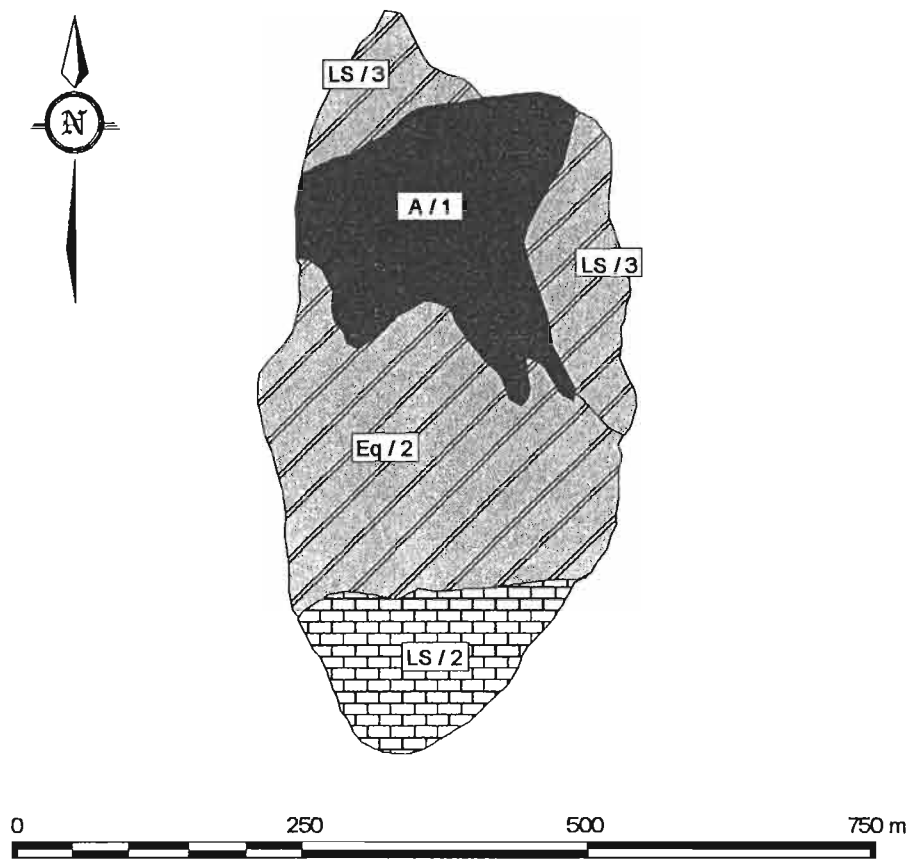
PROFONDEURS DES SOLS



MATERIAUX



Annexe V.2.2. Carte pédologique du bassin versant El Muerto.



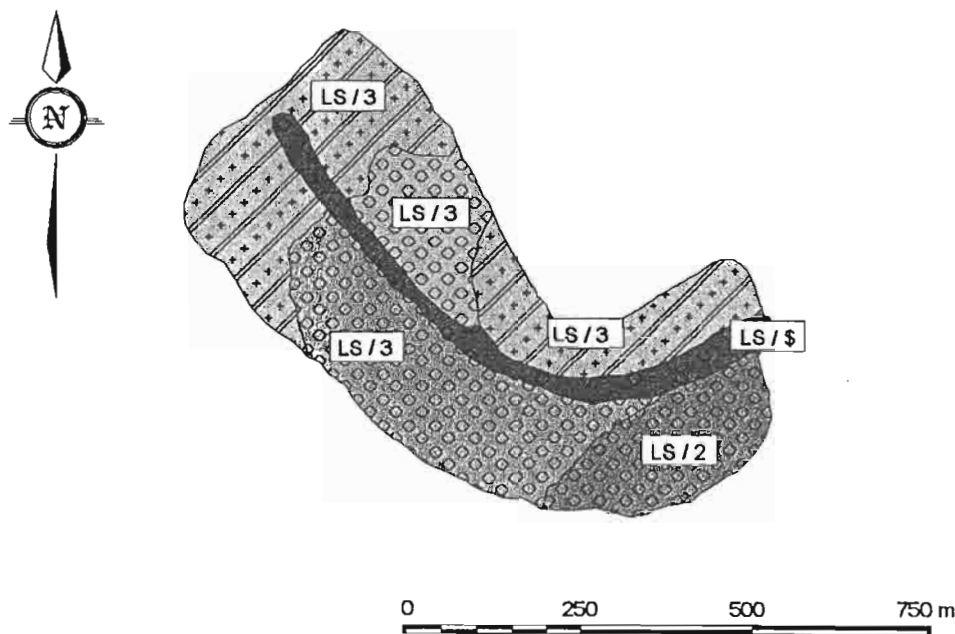
PROFONDEURS DES SOLS

	Sol squelettique sur roche dure (litosol)		Sol très profond
	Sol superficiel (< 30 cm)		

MATERIAUX

	Calcaire		Colluvions - Eboulis		Croûte calcaire

Annexe V.2.3. Carte pédologique du bassin versant Oso Negro.



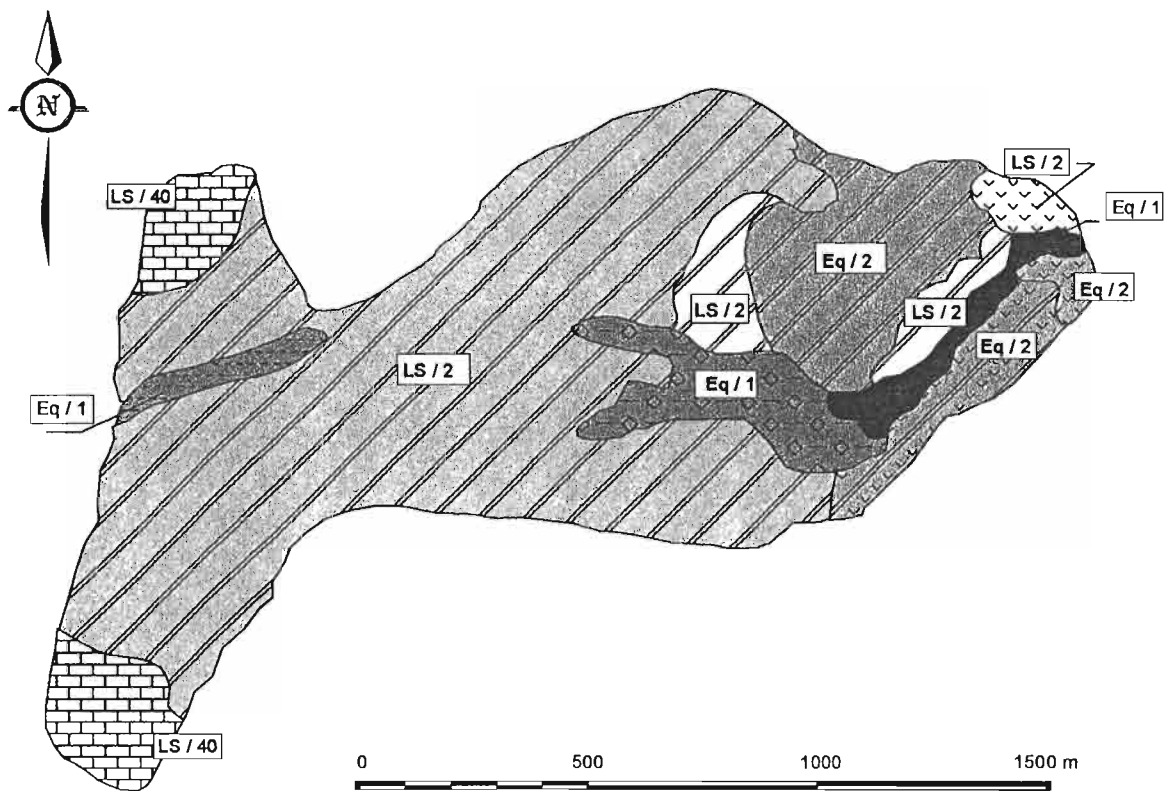
PROFONDEURS DES SOLS

	Sol superficiel (< 30 cm)		Sol semi-profond (50 < P < 80 cm)
	Sol peu profond (30 < P < 50 cm)		Sol profond (80 < P < 120 cm)

MATERIAUX

	Basalte encrouté		Conglomérats		Colluvions - Eboulis

Annexe V.2.4. Carte pédologique du bassin versant Pastelero.



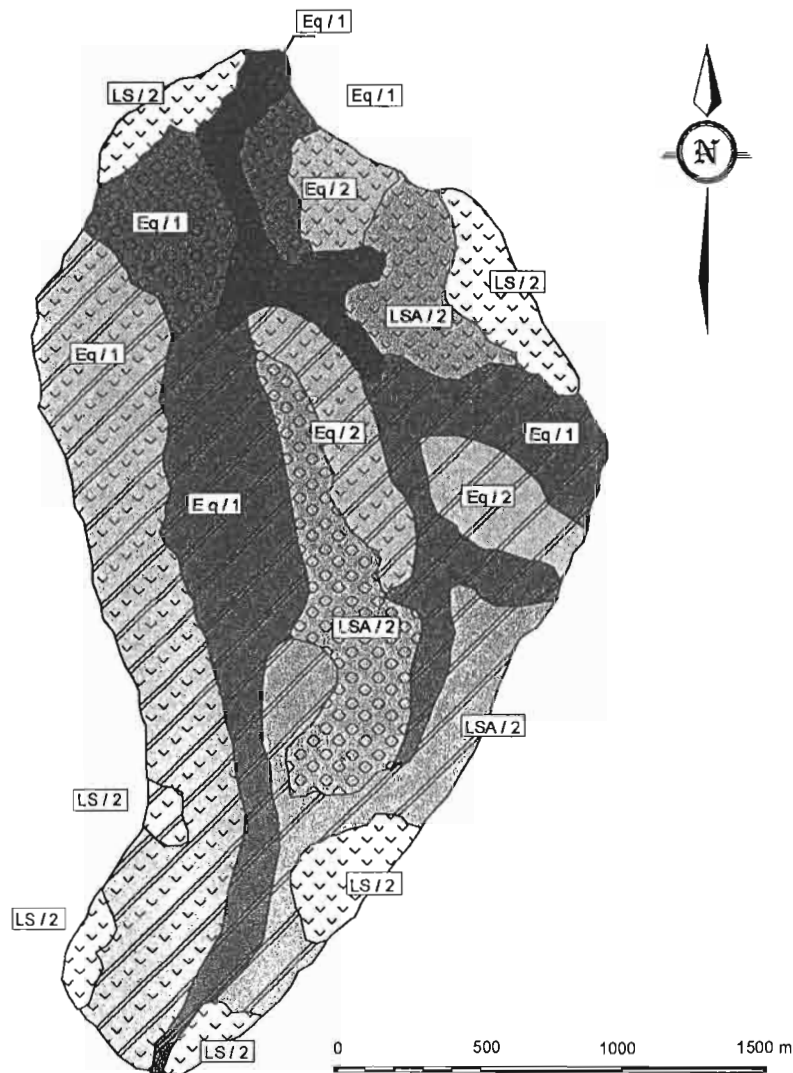
PROFONDEURS DES SOLS

	Sol squelettique sur roche dure (litosol)		Sol semi - profond (50 < P < 80 cm)
	Sol superficiel (< 30 cm)		Sol profond (80 < P < 120 cm)
	Sol peu profond (30 < P < 50 cm)		

MATERIAUX

	Calcaire		Ryholite encroutée		Croûte calcaire		Ryholite
	Alluvions		Colluvions - Eboulis				

Annexe V.2.5. Carte pédologique du bassin versant El Tullido.



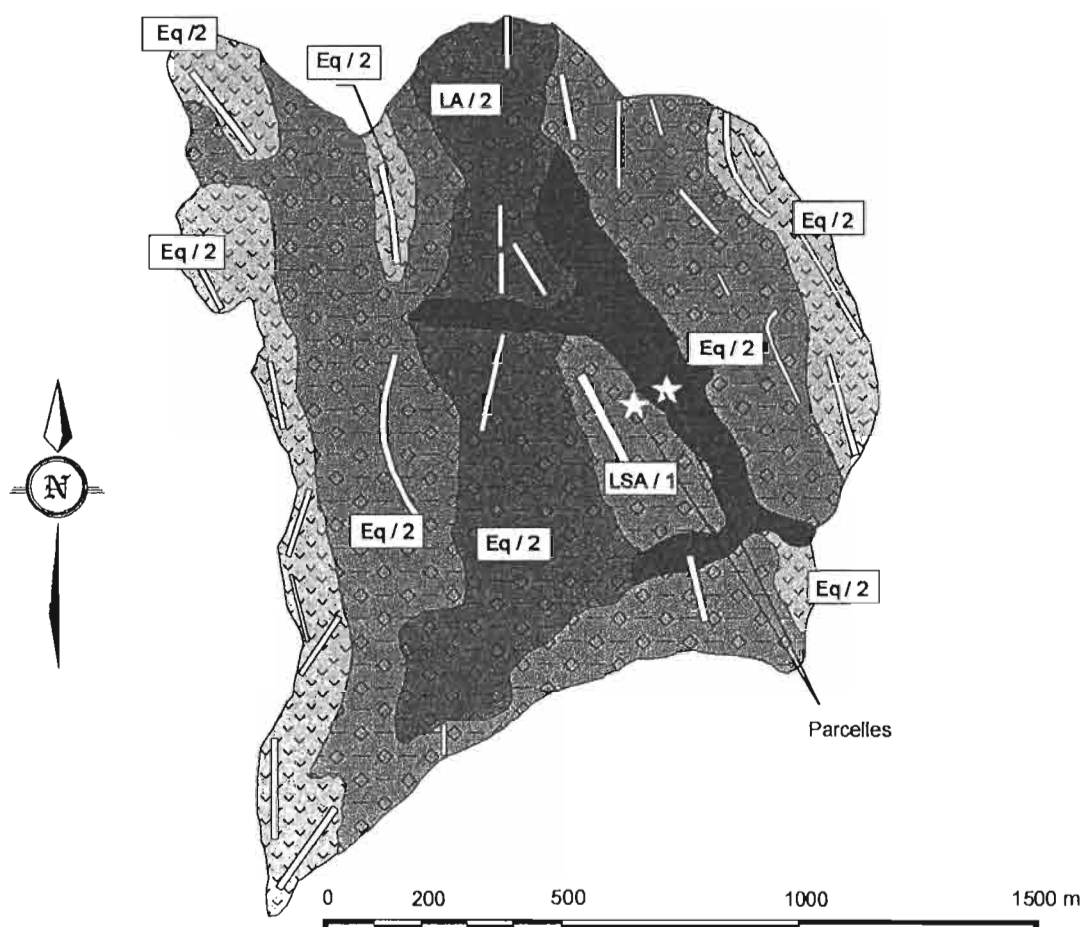
PROFONDEURS DES SOLS

	Sol squelettique sur roche dure (litosol)		Sol semi - profond (50 < P < 80 cm)
	Sol superficiel (< 30 cm)		Sol profond (80 < P < 120 cm)
	Sol peu profond (30 < P < 50 cm)		Sol très profond

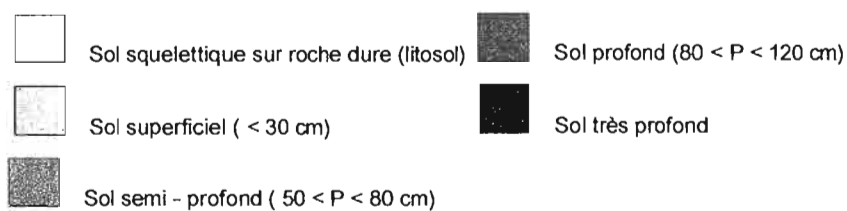
MATERIAUX

	Rhyolite		Conglomerats		Croûte calcaire		Ryholite encroutée
	Alluvions		Colluvions - Eboulis				

Annexe V.2.6. Carte pédologique du bassin versant El Viejo.



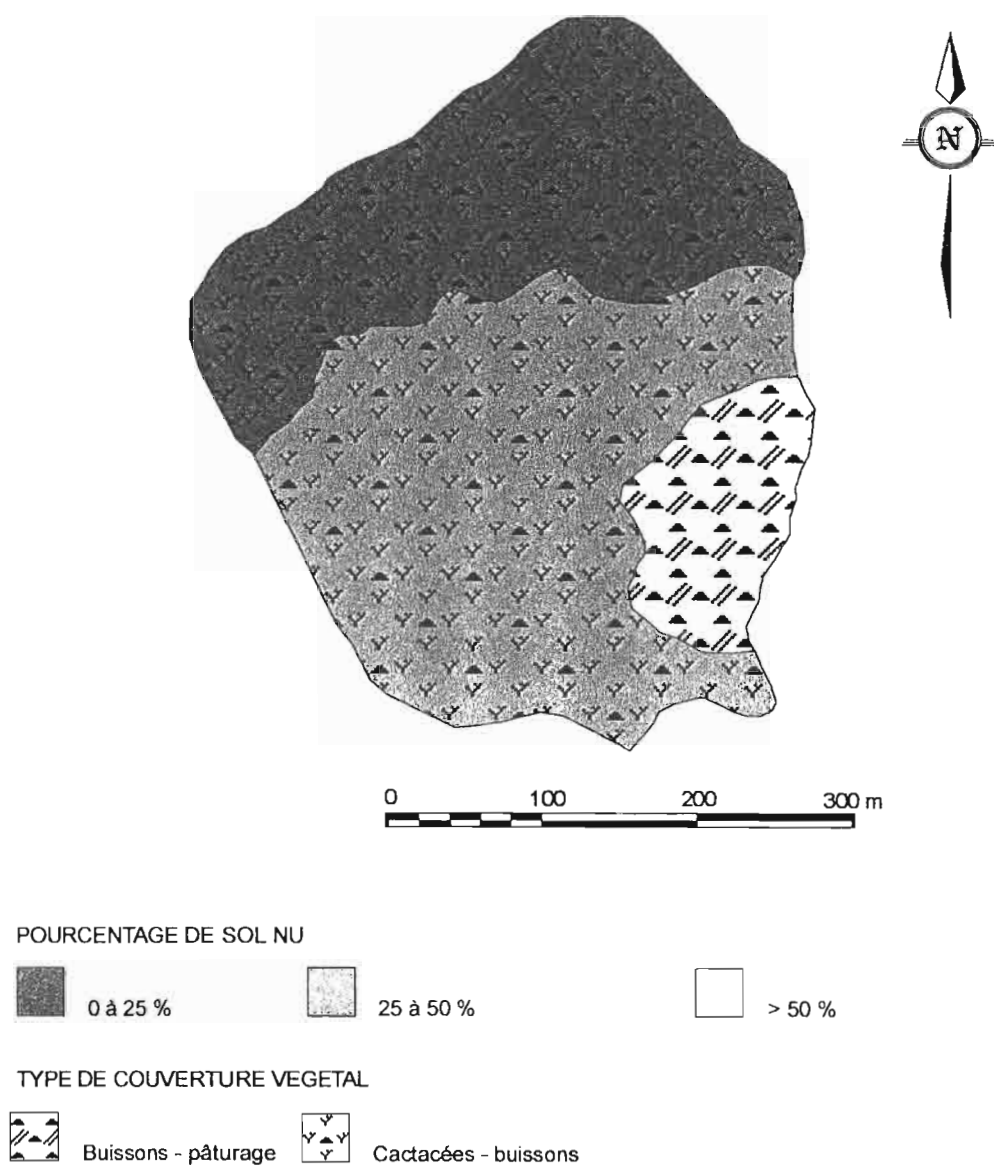
PROFONDEURS DES SOLS



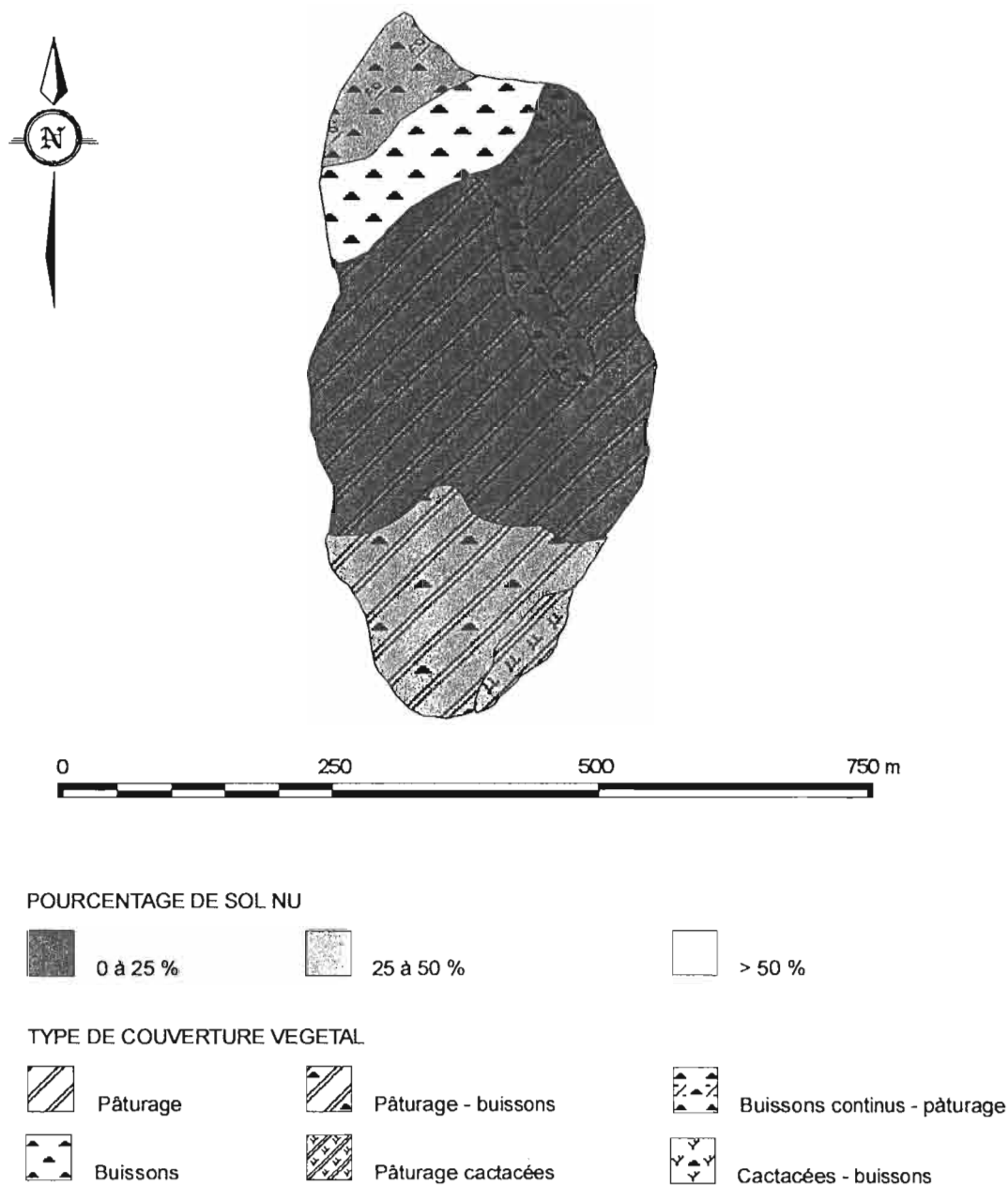
MATERIAUX



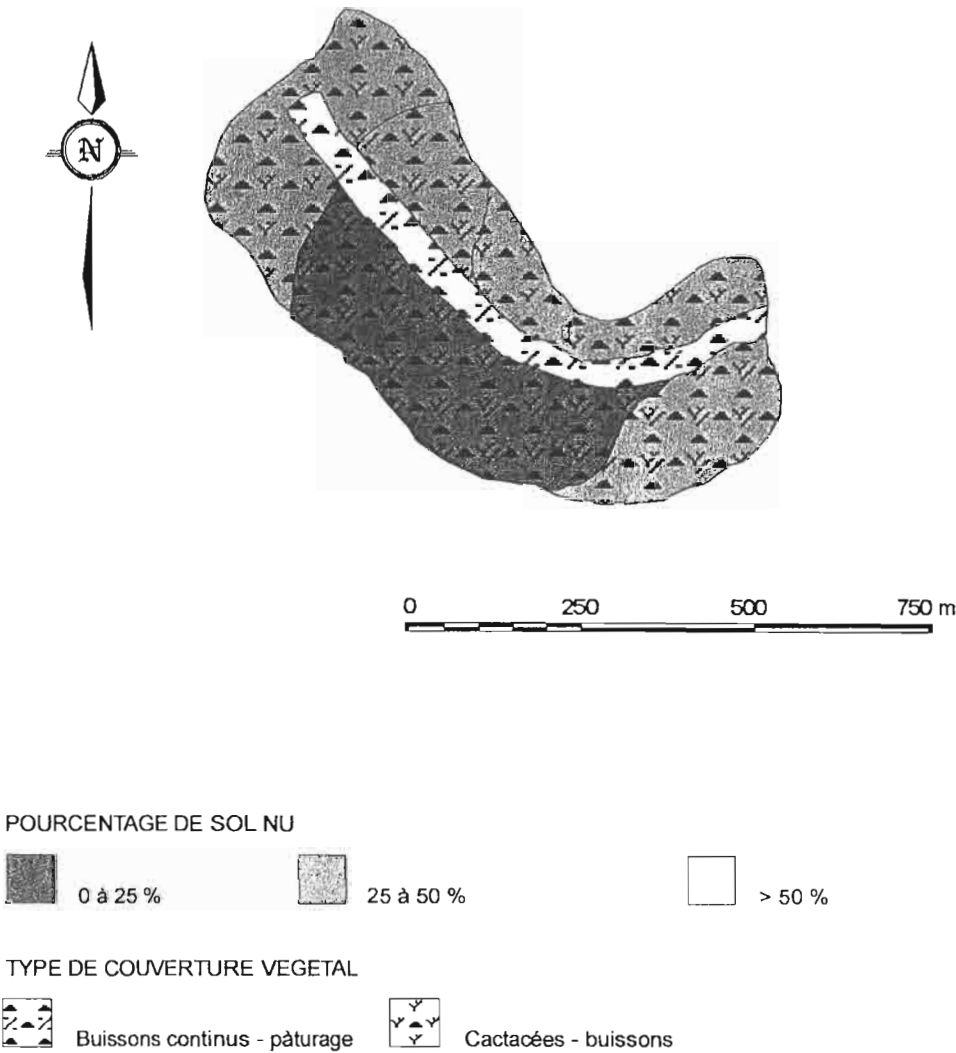
Annexe V.3.1. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant El Molino.



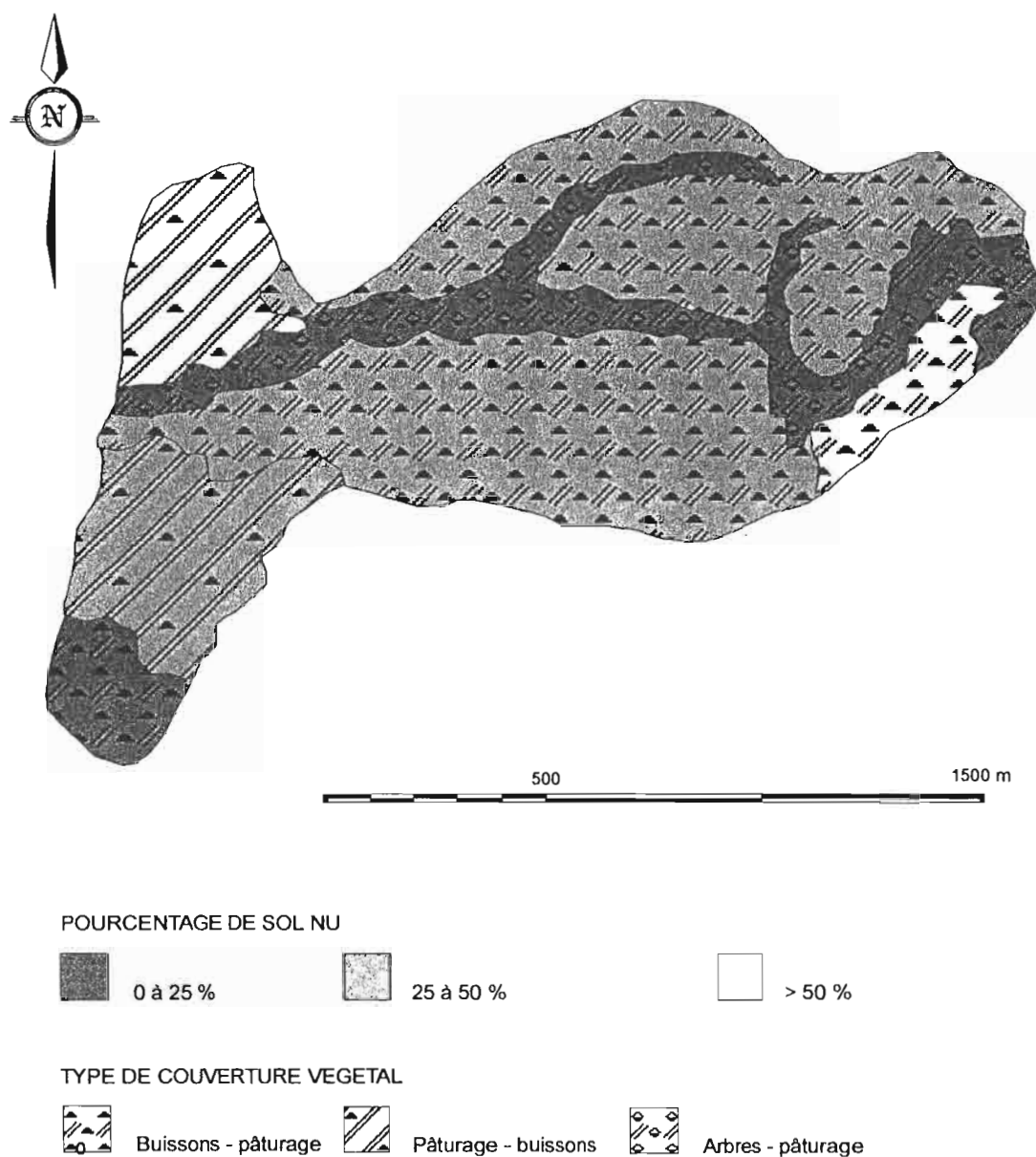
Annexe V.3.2. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant El Muerto.



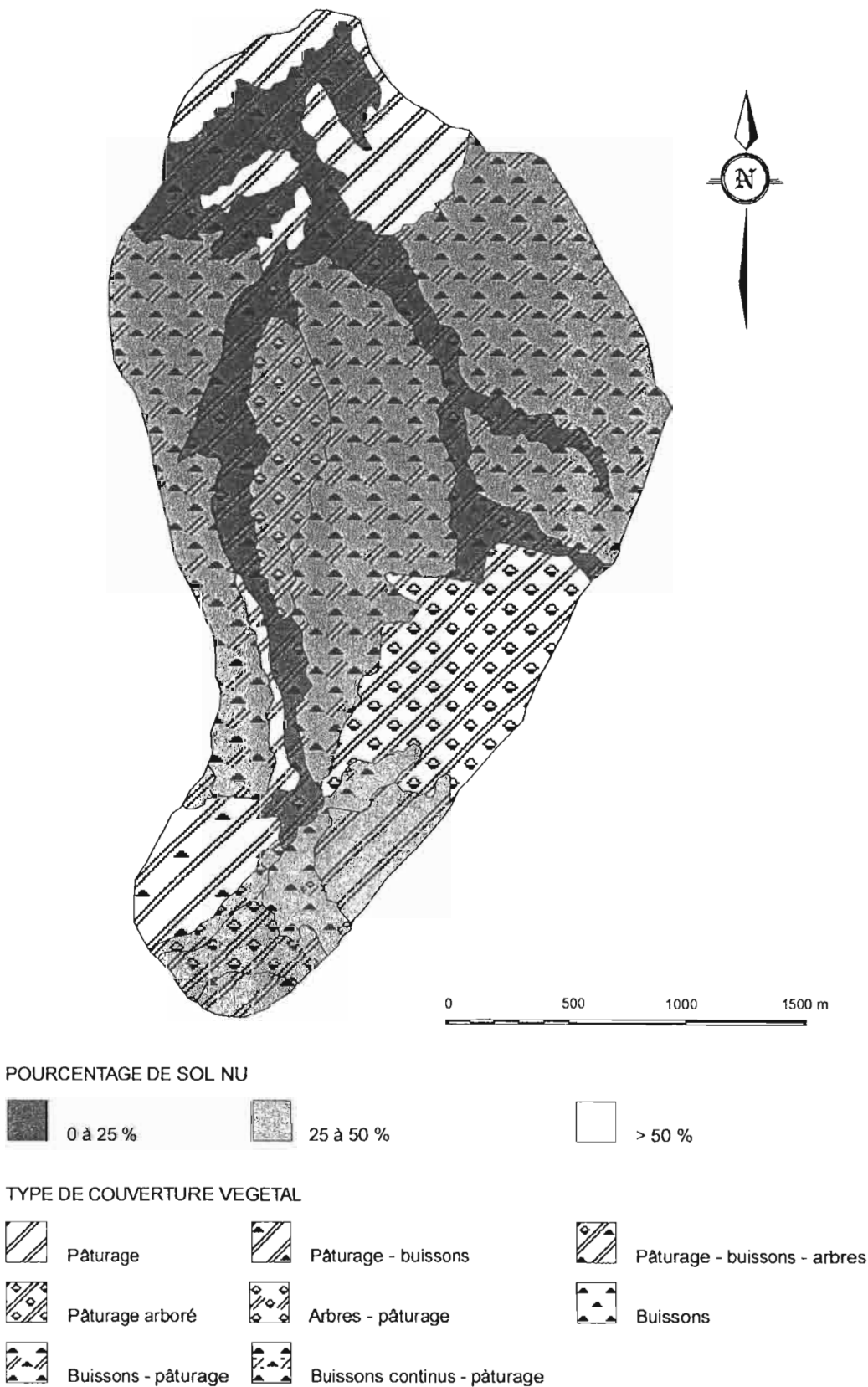
Annexe V.3.3. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant Oso Negro.



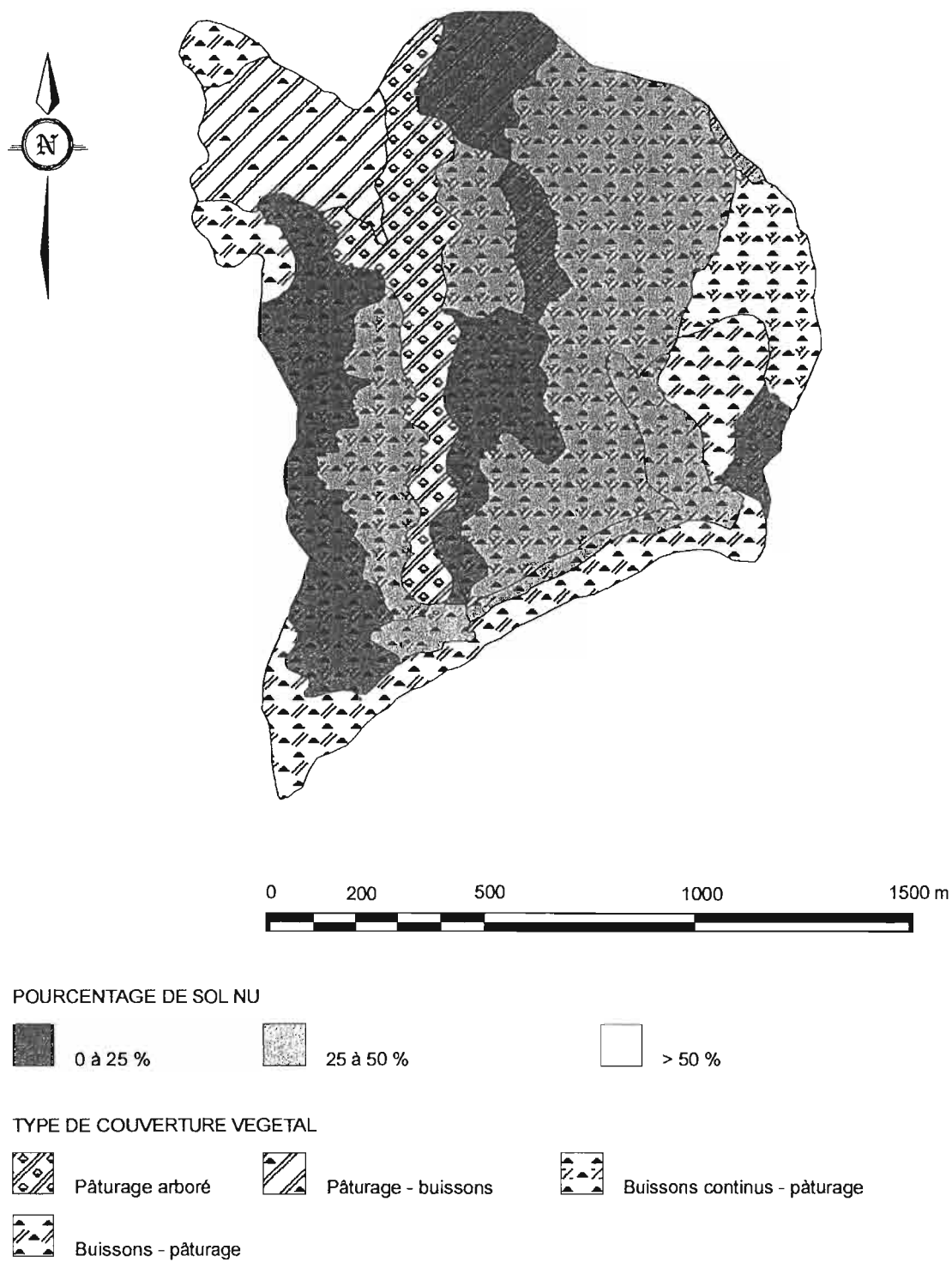
Annexe V.3.4. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant Pastelero.



Annexe V.3.5. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant El Tullido.



Annexe V.3.6. Taux de recouvrement de la végétation pour le bassin versant El Viejo.



ANNEXES DU CHAPITRE 6

Pluviométrie : VI.1.1. à VI.1.19.

Evaporation : VI.2.1. à VI.2.2.

ANNEXE VI.1.1. Coordonnées UTM, altitude et pluies annuelles des postes pluviométriques du ranch Atotonilco pour les années 1994 à 1998.

Num	Nom	Altitude	Coordonnées UTM		1994	1995	1996	1997	1998
		m	X	Y					
1	Escondida	2080	639408,9	12726110	293	319	479,7	449	310,0
2	Sauz Mocho	1980	635390,2	12726320	283	315	408,9	366	346,0
3	Mezquite	1990	627573,6	12727230	400	291	459	403	282,0
4	Calderona	1915	621634	12731980	343	302	322,2	394	353,0
5	El Gabitan	1800	630816	12737720	322	258	419,6	378,4	267,0
6	Oso Negro	1850	630670,8	12733900	243	231	330,3	460,5	254,0
7	San Jose	1875	631773,8	12731480	332	199	332	475	268,0
8	P. del Huevo	1925	631457,4	12729330	334	236	350,3	438,9	230,0
9	El Sol	2030	627823,9	12724460	437	319	452,2	402	304,0
10	Carboneras	2075	628778,3	12721520	410	331	525,2	413,2	337,0
11	P. Herradero	2200	628894,1	12719830	387	326,6	507	453	322,0
12	San Marcos	1990	623428,8	12725830	347	302	409,5	396,2	326,0
13	El Frances	1960	619328,8	12729800	394	315	119,2	380	284,0
14	El Rayo	2110	623000	12721850	239	335	426	411	249,0
15	Las Liebres	1975	636882	12731660	286	339	464	421	
16	Calabazas	2085	637967,3	12721390	362	335	419	444	309,0
17	Coronela	2075	635092,8	12719400	393	335	548,4	405	322,0
18	Las Jaulas	1740	631597,6	12741080	215	189	422,9	350	
19	Haciendilla	1694	631769,2	12743670	230	159	412,1	346,4	
20	Ocuila	1650	632387,3	12746470	146	201	399,6	380,1	
21	Peñoleros	1745	626788,9	12745310	127	184	411,1	333,6	
22	Atotonilco	1985	631271,8	12725240	380	257	492	432,5	288,0
23	Los Angeles	1880	635600	12736380	141	217	430,5	558,5	
24	Cuencame	1590	631264,5	12749480	100	137	375,3	332,8	
25	12 de Diciembre	1960	644061,3	12732470	173	272	411	395	
26	Carboneras bas	2088	629220,9	12722260		280,5	528	423,6	310,0
27	Carboneras haut	2115	629621	12722210		260,5	508	442,6	322,0
28	Tulido A	1985	625858,1	12727490		226	490,3	351,9	314,0
29	Tulido B	1995	625523,5	12727210		240	486,6	379,3	311,0
30	Pastelero A	2005	632517,2	12722600		298	507,8	400,5	318,0
31	Pastelero B	2015	631652,1	12720690		328	SD	SD	313,0
32	El Viejo	2150	632090	12718400		292	SD	SD	
33	Colorada	2125	631652	12720690			465,9	429,5	322,0
34	El Viejo	2200	630583,2	12718800	N		549,9	496	384,0
35	Pastelero	2025	632095,2	12722660	O		521,6	404,5	
PM	Yerbanis	1900	617900	12736000	N		SD	445,1	
PG	Yerbanis	1900	617900	12736000			SD	386,0	
PG	Tulido	2025	625791,2	12725580	I	N	479,3	379,2	
PG	Pastelero	2015	632183,6	12722230	N	O	455,5	346,6	
POD	Carboneras	2085	629120,9	12722590	S	N	465,2	481,4	
PM	El Muerto	2090	629041,3	12723460	T		450,9	190,1	295,0
PM	Las Jaulas	1740	631597,6	12741080	A	I	451,5	374,9	
PM	Mezquite	1990	627573,6	12727230	L	N	455,7	375,6	244,5
POD	El Viejo	2180	631300,7	12718200	L	S	554,5	419,0	
PM	El Viejo	2150	632090	12718400	E	T	SD	403,0	274,0
POD	Los Angeles	1885	635600	12736380		A	492,7	SD	
POD	Oso Negro	1890	629950,8	12734260		L	365,5	531	
PM	Ocuila	1640	632387,3	12746470		L	393,5	377,7	
PG	Ocuila	1640	632387,3	12746470		E	SD	371,6	
PG	Atotonilco	1980	631410,7	12725390			SD	313,0	
PM	Atotonilco	1980	631410,7	12725390			SD	348,5	
PM	Zapata	1970	630649,2	12725720			503,5	431,2	
PG	Basalle	1970	631723,4	12727110			388,6	167,8	222,5
PM	12 Diciembre	1980	644061	12732470			411	261	
PM	Chico	2065	634200	12719640			SD	163,8	257,0
PM	Cuencame	1590	631264,5	12749480			SD	182,7	

POD Pluviographe OEDIPE
PG Pluviographe mécanique
PM Pluviomètre
SD Sans données

En italique : année incomplète

ANNEXE VI.1.2. Pluies mensuelles du ranch Atotonilco : 1996.

	Poste	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	Escondida					13	13	151,7	142,2	78,8	72	9	
2	S. Mocho					19	26,5	42,9	156,6	95,9	57	11	
3	Mezquite					8	21	22	181,5	115,5	97	13	
4	Calderona	3				9	26,5	23,5	119,7	50,5	85	5	
5	Gabilan						59,8	38	144	65,9	104,9	7	
6	O Negro						36,5	35,9	103,3	60,3	84,3	12	
7	San Jose			3		5	27,5	37,5	114,1	52,6	84,3	8	
8	Huevo	4				3	37,5	33,5	112,8	71,1	81,4	7	
9	El Sol						28,4	29	201,2	84,5	98	11,1	
10	Carboneras		3			10,5	68,5	51,5	186,4	77,5	116,1	11,7	
11	Herradero		2			29	38	72	157	103	85,2	20,8	
12	S Marcos					7	19,5	64,2	161,3	64,5	78	15	
13	Frances					13	16,4	53,6	36,2	SD			
14	El Rayo					6	16		67	187			150
15	Las Liebres						71,5	67,4	138,8	71,7	96,2	18,4	
16	Calabazas					12,5	53,8	38,6	83	153	59,1	19	
17	Coronela					17	64,3	48,5	142	205,5	56,1	15	
18	L Jaulas						56,1	29	95,8	119	118	5	
19	La Haciendita						44,8	17,3	122	92	126	10	
20	Ocuila		4				45,8	41,4	107,4	72,5	123,5	5	
21	Pañoleros		5				29	76	79,5	59	157,6	5	
22	Atotonilco		3			11	42	57,5	134	148	85,5	11	
23	L Angeles			3		3	SD	2,9	120,6	57,1	125,9	32	
24	Cuencame		5,5				56,1	39,1	97,1	69,6	103,9	4	
25	12 de Diciembre				10	65	46	39	118	47	78	8	
26	Carbo haut					12	65,5	41,5	166,3	119	110	14	
27	Carbo bas		1			11	67	37	159,5	120,5	99	13	
28	Tulido A					13	24,9	27,5	217,2	105,5	89,2	13	
29	Tulido B					12	23,9	31	214,8	102	78,9	24	
30	Pastel A					7	41,5	58,1	209	109,2	72	11	
33	Colorada					6	77,3	63,4	143,7	95,5	69	11	
34	El Viejo					9	51	83	189,5	120,5	83,4	13,5	
35	Pastelero						45	67,9	209,7	109	71,9	18	
PM	Yerbanis	SD											
PG	Yerbanis	SD											
PG	Tulido					5,3	21,2	35,4	199,7	106,5	93,2	18	
PG	Pastelero					5,6	42,3	51,1	176,8	98	70,7	11	
POD	Carboneras					2,1	64,2	40,7	162,3	78,8	106,1	11	
PM	El Muerto					1,7	33,8	30,6	185	83,8	104,8	11,2	
PM	Las Jaulas					4	70,1	41,7	95,9	120,4	119,4		
PM	Mezquite					8,9	16,2	31,8	183,3	115,7	92,7	7,1	
POD	El Viejo					9	56	86	214	98	73,5	18	
PM	El Viejo	SD											
POD	Los Angeles						56,9	57,8	152,1	69,6	138,3	18	
POD	O Negro					2	43	34,5	117	56,5	100,5	12	
PM	Ocuila						48,8	41,4	118,2	57,3	117,8	10	
PG	Ocuila	NON INSTALLE											
PG	Atotonilco	SD											
PM	Atotonilco	SD											
PM	Zpata					29,5		62	202	96	101,5	12,5	
PM	Basalto					2,3	51	39,3	139,7	72,5	73,8	10	
PM	12 Diciembre				10	65	46	39	118	47	78	8	
PM	Chico	NON INSTALLE											
PM	Cuencame	SD											

POD Pluviographe OEDIPE
 PG Pluviographe mécanique
 PM Pluviomètre
 SD Sans données

En italique : mois incomplet

ANNEXE VI.1.3. Pluies mensuelles du ranch Atotonilco : 1997.

	Poste	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	Escondida	28	20	19	40	26	51	75	53	56	62		19
2	S. Mocho	27	21	11	22	43	49	52	23	42	64		12
3	Mezquite	26	19	38	24	40	40	68	20	69	41		18
4	Cabrerona	29	17	45		63	59	61	34	42	24		20
5	Gabilan	29	20	34	29,9	33	11		102	27,5	51,5	18,5	22
6	O Negro	21	22	31	32,5	34,5	116	76	18	73	33,5		3
7	San Jose	31	18	24	29,2	38,8	99	59	22	78,5	56,5	19	
8	Huevo	30	18	18,5	27,5	27,9	82	61	28	67,5	57,5	21	
9	El Sol	30	23	31	16	41	53	63	37	58	50		
10	Carboneras	31	16	22	23	28	42	103	35	45,2	49	13	6
11	Herradero	33	18	17	35	40	40	91	62	58	38	15	6
12	S Marcos	38,3	17	27	25	46	35	88,8	29,4	44,7	35		10
16	Cabazas	30	19	18	16	67	46	102	36	42	53		15
17	Coronela	29	20	27	13	47	62	66	42	37	60		2
18	L Jaulas	32	18	33	36	22	47	34	26	50	41	11	
19	La Haciendita	57	22		35	17	44	40	27	68,4	31	5	
20	Ocuila	33	16	50	35	22	50	40	25	48,7	42,4	11	7
21	Peñoleros	35	20	29	34	31	44	42	19	23	39,2	10,9	6,5
22	Atotonilco	30	18	14	37	25	53	75	29	76	51		24,5
24	Cuencame	30	17	35,9	34	16,8	49,1	27	21	45,5	46	7	3,5
25	12 de Diciembre	29	18	14	32	42	50	57	23	43	73	10	4
26	Carbo haut	36	15	23,9	25,2	29	41	87	25	41	64	12,5	24
27	Carbo bas	37	14	23,9	25,2	30,5	38,5	94	35	45	67,5	11	21
28	Tulido A	32	14	41,3	30,5	4,1	40	64	19	59	37,5	10,5	
29	Tulido B	39	19	43,6	29,5	4,2	40	74	21	60	37	12	
30	Pastei A	29	19	21	28	25	42	85	29	64,8	48,8	8,9	
33	Colorada	27	18	24	27	35	36	108	37	61	40,5	16	
34	El Viejo	31	17	29	22	48	44	101	81	72	33	16,5	1,5
35	Pasteiro	29	19	21	26	27	43	88	33	53	49,5	16	
PM	Yerbanis	31	16	22,5	42,5	51,2	29,3	60,1	81,6	56,7	45,2	9	
PG	Yerbanis	31	16	15,5	43,4	51,2	14,4	55	53,2	54,7	37,5	13,5	0,6
PG	Tulido	18,9	17,3	39,5	30,5	4	43	74,5	30	63,5	39,5	16,5	2
PG	Pasteiro	29	19	22,9	26	26,9	39	78	25	51,7	24,4	4,7	
POD	Carboneras	38,8	14,1	29,1	25,3	36	54,6	102	46,8	49,2	65,7	13,8	6
PM	El Muerto	SD					18,7	46,4	30,5	45,7	38	10,8	
PM	Las Jaulas	29,5	19,5	36,9	40,8	25,7	42,5	31,5	21	58,7	47,2	13,8	7,8
PM	Mezquite	26	19	22	11,1	43,5	39,3	71,5	18,2	71,5	21,6	13,9	18
POD	El Viejo	34,1	17,9	20	25,5	49	39	60	49	65	42	16	1,5
PM	El Viejo	29,4	14,9	28,5	23,9	40,9	17,1	91,4	44,5	63,7	34,7	14	
POD	Los Angeles	NON INSTALLE											
POD	O Negro	43	22	25	33,5	44	123	79,5	22	73,5	49,5	16	
PM	Ocuila	24,5	19,3	52,4	35,2	25,3	49,5	47,5	24	43	41,9	11,5	6,1
PG	Ocuila	23,9	18	52,5	28,3	20	54,2	47,4	24	54,5	38,7	10,1	
PG	Atotonilco	31,8	19	10	25,6	31,8	45	51	13	77			8,8
PM	Atotonilco	33	20,5	19,5	25,5	31,5	36,5	87	25,5	69,5			
PM	Zpata	41	20	19,8	24,5	47	62,3	65	18,1	66	57	7	3,5
PM	Basalto	SD					27,1	31,7	62	40	7		
PM	12 Diciembre	28,5	19	11	31,5	39,5	50	59	22,5				
PM	Chico	SD					7,3	38,8	65,9	36,8	15		
PM	Cuencame	34,9		35,7	39,5	18,6	54						

POD Pluviographe OEDIPE

En italique : mois incomplet

PG Pluviographe mécanique

Les totaux sont 13, 14, 15 et 23 : uniquement le total annuel

PM Pluviomètre

SD Sans données

ANNEXE VI.1.4. Pluies mensuelles du ranch Atotonilco : 1998.

	Poste	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	Escondida			9				61	110	54	68	8	
2	S. Mocho			8				53	183	58	39	5	
3	Mezquite	2	1				18	16	112	95	30	8	
4	Calderona	8					26	16	204	86	10	3	
5	Gabilan			2		-	-	-	-	-	160	105	
6	O Negro			4				34	115			1	
7	San Jose			2				34	153		70	9	
8	Huevo			1			6	33	117	46	22	5	
9	El Sol				1		30	20	102	100	43	8	
10	Carboneras	1	3				13	66	129	66	44	15	
11	Herradero	2		3				64	118	67	53	15	
12	S Marcos						30	22	136	77	59	2	
16	Calabazas			2				63	97	55	84	8	
17	Coronela						11	49	109	84	60	9	
18	L Jaulas	SD											
19	La Haciendita	SD											
20	Ocuila	SD											
21	Peñoleros	SD											
22	Atotonilco	2	3				15	49	107	47	56	9	
24	Cuencame	SD											
25	12 de Diciembre	SD											
26	Carbo haut						19	66	132	63	19	23	
27	Carbo bas						22	64	109	71	29	15	
28	Tuldo A						37	16	113	94	45	9	
29	Tuldo B						42	15	111	93	46	4	
30	Pastel A		4				18	57	131	65	28	15	
33	Colorada		2				16	48	152	62	38	14	
34	El Viejo		5				12	44	172	93	47	11	
35	Pastelero		2				20	56	129	64	26	16	
PM	Yerbanis	SD											
PG	Yerbanis	SD											
PG	Tulido	SD											
PG	Pastelero	SD											
POD	Carboneras	SD											
PM	El Muerto						20	62,5	127,5	73	12		
PM	Basalte						10	34	105	42	31,5		
PM	Mezquite						14	11	113,5	89	17		
POD	El Viejo	SD											
PM	El Viejo						23	154	73	24			
POD	Los Angeles	SD											
POD	O Negro	SD											
PM	Ocuila	SD											
PG	Ocuila	SD											
PG	Atotonilco	SD											
PM	Atotonilco	SD											
PM	Zpata	SD											
PM	Basalto	SD											
PM	Chico								153,5	86,5	17		
PM	12 Diciembre	SD											
PM	Cuencame	SD											

POD Pluviographe OEDIPE
 PG Pluviographe mécanique
 PM Pluviomètre

SD Sans données
 En italique : mois incomplet

ANNEXE VI.1.5. Pluies journalières des postes pluviométriques : juin 1996.

Num	Nom	Jour																												
		1	2	3	4	6	7	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	29	30				
1	Escondida										3		6	4																
2	Sauz Mochu										15		7,5	4																
3	Mezquite						1				2			5,5																
4	Calderona								3		9			10																
5	El Gabilan								6		3	7,9	23,6	7,8																
6	Oso Negro					4					2,1	7,3	2,1																	
7	San Jose					3					4	2,1	7,3	2,1																
8	P. del Huevo					3					5	3,3	9,9	3,8																
9	El Sol										4		8,7	5	0,8															
10	Carboneras	21,5									3	1	20,2	5,4	0,4															
11	P. Herradero									6	5		17																	
12	San Marcos													10																
13	El Frances													8,4													9,5	8		
15	Las Liebres					11					8,4		18,7	6,6																
16	Calabazas					3,5					4	5,2	11,7	4,1																
17	Coronela					2					2	8,3	18,6	6,6																
18	Las Jaulas										5		25	1,4																
19	Haciendita										7		22	1																
20	Ocuila					3					6		19	2																
21	Pañoleros					10					5		14																	
22	Atotonilco					4					5		16																	
23	Los Angeles	SD																												
24	Cuencame					4,1					8,2		26	2,7																
25	12 de Diciembre										17		21																	
26	Carboneras bas	11									2	5	28	7,4	0,6															
27	Carboneras haut	11									1		6	31,5	8,3	0,7														
28	Tulido A					2																								
29	Tulido B					1					1	1																		
30	Pastelero A	2									1	5		11,2	3,8															
33	Colorada	9										5		24,9	8,7															
34	El Viejo											1	1	15	14															
35	Pastelero	2									1	5		11,6	3,9															
PG	Tulido	0,1						0,4	0,4	1,3	0,3	0,8	2,7	2,6	0,3	0,1				0,1	0,1	0,1	1,5	0,9	0,8	1,8	6,9			
PG	Pastelero	2,6								2,5	5,1	0,1	11,4	4																
PG	Carboneras	8,6			0,1			0,4	0,2	3	5,4	1,3	27,5	7,3	0,6															
PG	El Muerto	3,8	1,9																											
PM	Las Jaulas										1,1	5		26,5	2															
PM	Mezquite											0,5			6,8															
POD	El Viejo										7,4	1,6	1	12,5	12															
POD	Los Angeles					8						7		15	5															
POD	Oso Negro								4	1	1	3,5	10,5	3,5																
PM	Ocuila											4		29																
PM	Zapata																													
PG	Basalte	0,5			0,3					0,4	0,6	0,7	2,4	9,5	8,2															
POD	Pluviographe OEDIPE																													
PG	Pluviographe mécanique																													
																						</								

POD Pluviographe OEDIPE
PG Pluviographe mécanique

PM Pluviomètre
SD Sans données

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.1.6. Pluies journalières des postes pluviométriques : juillet 1996.

Num	Nom	Jour																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	Escondida					8			0,7	2,3	10,3	31,5	4,9		14,4	3			2,5	69,6					4,5							
2	Sauz Mochi					9			0,3	1	4,5	13,9	2,1		6,3	1,3			1,5						3							
3	Mezquite					4		4			5	6			1	2																
4	Calderona							6,5			6	10				1																
5	El Gabllan							2	1,9	0,6	2,5	22	0,9	1,3	1,4	0,5	0,4		3,5						1							
6	Oso Negro	2,5						2	1,6	0,5	2,2	19,1	0,7	1	1,1	0,3	0,4		3,5						1							
7	San Jose	6,5						2	1,6	0,5	2,1	18,3	0,6	0,9	0,9	0,3	0,3		3						0,5							
8	P. del Huevo	0,5						2	1,3	0,4	1,8	15,5	0,8	1,2	1,2	0,4	0,4		6						2							
9	El Sol					6,2			3,2		2,1	9,1			7,5										0,9							
10	Carboneras							1	4	6,3	7,1	15,6			15	2,5																
11	P. Herradero							3			2,5	32			25	2			1,5					4	1,4	0,6						
12	San Marcos					6	20,8	0,1	3,5	0,2	1	4,2	1,8	0,1	5	2,2	14,3								5							
13	El Frances					5	17,4	0,1	2,9	0,2	0,8	3,5	1,5		4,2	1,8	12							4,2								
15	Las Liebres		0,1						0,7	2,3	10,2	31,2	4,8		14,3	3								0,6	0,2							
16	Calabazas		0,1						0,3	1,1	4,8	14,5	2,3		6,6	1,4				2,5					5							
17	Coronela		0,1						0,4	1,5	6,6	20,2	3,1		9,2	1,9				4					1,5							
18	Las Jaulas								2,2		8,6	14,1													4,1							
19	Haciendita								1,3		5,2	8,4													2,4							
20	Ocuila								14,6		4,9	12,2			9,7																	
21	Peñoleros																		74						2							
22	Atotonilco							10			21,5	17														9						
23	Los Angeles										SD													2	0,7	0,2						
24	Cuencame								13,6		4,6	11,5			9,2																	
25	12 de Diciembre	5									12	4	10			8																
26	Carboneras bas							2	3,9	3,6	3,5	7,5			14	2,5									4,5							
27	Carboneras haut							1,5	3,4	3,1	3,8	8,2			13,5										3,5							
28	Tulido A					0,3	10	0,2	3		0,8	3,7	1,5	0,1	4,7	2,1	0,1								1							
29	Tulido B					0,3	10,5	0,2	3,1	0,1	0,9	3,8	1,6	0,1	6	2,7	0,2								1,5							
30	Pastelero A		0,2						0,6	2,1	9,4	28,8	4,5		8	2,5									2							
33	Colorada		0,1						0,6	2,1	9,4	28,8	4,5		13,2	2,7									2							
34	El Viejo					2	3		3	8	45,5				15	1,5								3,3	1,2	0,5						
35	Pastelero								0,7	2,3	10,6	32,3	5		11	2,5									3,5							
PG	Tulido					0,3	10,4	0,2	4,4	0,1	1,2	5,3	2,2	0,1	6,2	2,8	0,2								1,9	0,1						
PG	Pastelero		0,1						0,5	1,7	7,6	23,2	3,6		10,6	2,2									1,6							
PG	Carboneras								4,3	3,9	4,4	9,6			14,9	1,9			0,1		0,2			0,4	1							
PG	El Muerto	0,1					6,5		3,4		2,2	9,6			7,9										0,9							
PM	Las Jaulas								3,2		12,4	20,2																				
PM	Mezquite					2	7	6,5			4,3	7,2			2,8	2																
POD	El Viejo					2,5	1	2	1	2	6	50,5	0,5		13,8	0,9	0,3		0,5					3,3	1,2	0,5						
POD	Los Angeles		0,1						0,7	2,3	8	28	3,5		11	3									0,9	0,3						
POD	Oso Negro					2,5	2		1,5	0,5	2	17,5	1	1,5	1,5	0,5	0,5		3						0,5							
PM	Ocuila								14,6		4,9	12,2			9,7																	
PM	Zapata								32					12	13	5																
PG	Basalte					9,5					13,8	6,7	1,7		3,6	2							0,5		1,5							
POD	Pluviographe OEDIPE										2 signifie 2,0																					
PG	Pluviographe mécanique																															
	PM																															
	SD																															

POD Pluviographe OEDIPE
PG Pluviographe mécanique

PM Pluviomètre
SD Sans données

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.1.7. Pluies journalières des postes pluviométriques : août 1996.

Num	Nom	Jour																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	Escondida					27,5		9,5		1				2					2		3			22	17					11	14,3	32,9
2	Sauz Mocho					28,5		11,5		3,5				2	6				18		10,5			18,5	13					8	11,3	25,8
3	Mezquite		5	4	2,5	2,5	10		17	4			1	59	7				11		4			18	12			5	3			16,5
4	Calderona		1	4	4,5	2,7	9,5		11,5					23	5				5,5		2			10	8,5				9	2		21,5
5	El Gabitan	3,9		5,6	1	1,6	0,8		31	1,3	2,6		1	9,5	4,7	0,6			1,2		2,9		0,6	10,7	18			8,2	0,6	10,6	27,6	
6	Oso Negro	4,9		7,1	1,6	2,6	1,3		19	0,4	0,8		0,3	2,6	3						1			7	16				4	8,8	22,9	
7	San Jose		3	4,4	4,6	7,8	3,9		14	0,5	1		0,4	3,9	2						4	4,5	3	13	15,5				2	7,3	19,1	
8	P. del Huevo			1	1,9	3	1,5		19,5	0,8	1,6		0,7	5,9	2						8		1	13	17				0,5	4,5	8,6	22,3
9	El Sol		0,4	0,6		3,2	4,2	7,6	23,8				0,2	25,6	13,2				18		1,5	2,5	19	13,3			4,2	7,4		24	32,5	
10	Carboneras	2,5				4	4		28,5		0,5		3	30	13					1	12,1	3,9		15,5	13,9			4	6,5	18,5	25,5	
11	P. Herradero	2,4				3,6			29		1			19	22						15		2	22,5					16,5	10,5		13,5
12	San Marcos	1	1	5		2,6	15,4	10,8	5	2,5				25,4	13,1				3,5		1,5			16	15			4			39,5	
13	El Frances	0,8	0,8	4,2		2,2	12,9	9	4,2	2,1																						
15	Las Liebres		0,2	12,4	0,2	4,9	0,4		14,2	6,4	0,4			4,7	1,6	0,6			1,3				13,1	33,8				4,9	0,3	1,6	24	
16	Calabazas								13,5		2			9,5					9		11			15	20				3			
17	Coronela								24		4			32					12		39			13	15				3			
18	Las Jaulas				6,8	3	17		15					18		1							11	23					3			
19	Haciendita				15,2	5,1	27,7		15					6		1							18	19			13		2			
20	Ocuila			21,9			7		10,5	2				4		2,5							18,7	19,8							7	14
21	Peñoleros					15			12					5	9	3							2	25						8,5		
22	Atotonilco				2				40				6,5		16	12			9			14	16	22				0,5	5			
23	Los Angeles		0,2	13,9	0,2	5,6	0,5		16	7,2	0,5			5,3	1,9	0,7			1		10,2			9,7	25			3,6	0,2	1,2	17,7	
24	Cuencame			25,5					14		6			0,5	3,5									11,7	12,3					5		18,6
25	12 de Diciembre			18		1	10		1		7								13					10	28			3		6	21	
26	Carboneras bas					3,3	3,5		33,5				3	24	11				2		9			10,5	19		6,6	10,9		10,5	19,5	
27	Carboneras haut	1,5				3,2	3,4		30,9	1			3	22	13,5				2		11,5			2	19		7	11,5		10	18	
28	Tulido A	1,5	1,5	5		3,7	21,5	15	7	2	2,7	2		35	17,9	8,5			6		0,5	0,5		18	18,5			1,5	2	15,4	31,5	
29	Tulido B	2,2	2,2	4		3,6	21	14,6	6,8	2	2,7	3		36	18,6	1,5			6,5		1	1		17	16,5			2,5	3	16,4	32,5	
30	Pastelero A		2	1,4	0,9	13,7			35	3	3	2		0,5	20,8	12,9			2,5				1	19	17		1	3	0,5	26,5	27	
33	Colorada							5	2,7	2,7	1,8		0,5	25,8	4,5	0,2	0,3	0,1	4,6				14,2	2,8	16,4	15,6		3	6	17,3	20,2	
34	El Viejo	2				3		44		1				25	23				2		32,5			0,5	20				14,5	9,5	2,5	10
35	Pastelero		5,1	1,3	0,8	12,7			31,5	3,5	3	3,5		0,5	20,1	12,7			3				15		21	17		1	5		25	28
PG	Tulido	0,3	0,3	1,4		2,7	15,7	11	5,1	2	2,7	2,5		35	18				17,4				3		15,4	13,3		2,2	3,2	0,1	16,4	32
PG	Pastelero		1,9	0,5	0,3	4,7			23,9				0,4	21,8	3,8	0,2	0,3	0,1	4,6			14,3	2,8	16,5	15,7			0,6	8,2		25	29,2
PG	Carboneras			0,3		3,2	3,3		24,1	0,1			0,2	22,9	11,8	0,6			0,2	3,9			4,7	1,5	0,1	17,8	16		4,6	7,5	16,4	23,1
PG	El Muerto		0,4	0,6		3,4	4,4	8	25					26	13,1				15,3				4,8	0,9		17,7	16	0,1	5	4,1	16,8	23,4
PM	Las Jaulas				9,8	3,3	17,9		15,4					19,3		1,4							4,1	20,2						3,4		
PM	Mezquite		2,5	5,3	2	3,5	10,8		18	4,5	0,5		0,5	59,5	7,4				10,5				3,6		19,2	16,5			1	2,6		15,2
POD	El Viejo	7		1	1	2			31,5		0,5		0,5	27,5	23,5				1,5				31		20	18			8,5	2,5	8,5	29,5
POD	Los Angeles		0,3	18	0,3	7,2	0,6		20,7	9,3	0,6			6,9	2,4	0,9			1,2				12,6		12	30,9			4,5	0,3	1,5	21,9
POD	Oso Negro	5,5		8	2,5	4	2		16,5	0,5	1		0,4	3,6	4	0,5			1				2,5		0,5	9,1	15,4		7	0,5	9	23,5
PM	Ocuila			21,9		7,6	5,8		10,4	2,5				4,8		1,5									19,1	20,1			1,6		6,1	16,6
PM	Zapata			5		4,5			30,5	1,5	5,5			16	15,5	0,5									17	25		2	6,5		16	38
PG	Basalte	0,5	3,4	1,3	6,2				4,4	0,3	4,3			6,7	0,1									12,1	2,2		0,1	16,7	19,2		16,3	37,3
POD	Pluviographe OEDIPE																															
PG	Pluviographe mécanique																															

POD Pluviographe OEDIPE
PG Pluviographe mécanique

PM Pluimètre
SD Sans données

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.1.8. Pluies journalières des postes pluviométriques : septembre 1996.

Num	Nom	Jour																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Escondida	0,4	24,9	4,5	6				3				3	7					29	29							1					
2	Sauz Mochio	0,3	19,6	11	4				2,5	0,5			3	12					36	36		1					6					
3	Mezquite			63,5	6		1		1	3			13	11						17												
4	Calderona			16	7,5					1			8	3						15												
5	El Gabilan	6,8	2,3	13,5				2,9	2,9	1,2			17,6	14	0,6				1,6	1,6	0,5											
6	Oso Negro	7,3		10				3	2	1			16	11					10	10												
7	San Jose	6,1	9,5	8						2			4	13					7	7										3		
8	P. del Huevo	7,1	17	9						4			5	14					9	9										6		
9	El Sol		19	10				0,5	5,5				2,5	13					34													
10	Carboneras		20	3,5				2	9				5	13					23								2					
11	P. Herradero	27		17	4			2					8	16					10		4	2					13					
12	San Marcos		5,5	8				2	3			0,5	8,5	12					19		6											
13	El Frances	SD																														
15	Las Liebres	3,6	1,3	18,4					2,3				7,6	14,6					8,5	6,2	6,2	0,3	1	1		2,7	3,6		0,4			
16	Calabazas	77	5	30					4	1			3	8					25	25												
17	Coronela	83	18	41					9,5	1,5			10	19					18	18	0,5					2	3					
18	Las Jaulas	55	5	12					16				6	13					12	12												
19	Haciendita	38		20					10				8	16																		
20	Oculia	5,1	7,6	25,3									16	8						7										3,5		
21	Peñoleros	12,5		15									21	6																4,5		
22	Atotonilco	51,5		32	6				2	2			5	18					10	28	1								2,5			
23	Los Angeles	2,7	1	13,6					1,7				5,3	10,9					6,3	4,6	4,6	0,2	0,7	1,4		3,6	4,6		0,5			
24	Cuencame	5,5	8,2	27,3					4				4,8	8,8						8										3		
25	12 de Diciembre	2	3	10					5				6	11					10	10												
26	Carboneras bas		25	25	5,5		1	8	6,5	2			4	13					28								1					
27	Carboneras haut		26,5	21	4			4	2	2			7	19					32								3					
28	Tulido A		40	7				4,5	1,5			1	16	12					22		1,5											
29	Tulido B		28	9				5	4				14	15					27													
30	Pastelero A		25	6				2,8	1,4	1			9	17					44	1	1						2					
33	Colorada		29	7				2,5	1				15	16					13								12					
34	El Viejo	29		23,5	9		1	3		3			4	14					13								21					
35	Pastelero		29	5				3,5	1,5	1			8	17					41	1	1						2					
PG	Tulido	0,1	36,8	7,9	0,2		0,1	1,5	4,9	0,1			9	13,9				0,1	31,3		0,6											
PG	Pastelero	0,2	25,6	6,5	0,1			2,8	1,4	0,8			8,6	17,3	0,1				32,7	0,5	0,5							1,4				
PG	Carboneras	0,6	26,1	5,6	0,1	0,1	0,4	3	2,4	1,1			3,9	12					21,9		0,8							0,7			0,1	
PG	El Muerto		26	6,2				3,4	3,6	0,3			5	12,2					25,6		0,9							0,6				
PM	Las Jaulas	57,5	4,1	13,1					17,1				7,2	15,7						4	4									1,7		
PM	Mezquite			60	7,8				0,5	4				13,4	12					17,5	0,5											
POD	El Viejo	18,5		14,5		0,5		7,5		0,5		0,3	9,7	15	0,5				15		0,5	1						14,5				
POD	Los Angeles	3,3	1,2	16,8					2,1				6,9	13,5					7,8	5,7	5,7	0,3	0,9	1,5		3,9	5,1		0,6			
POD	Oso Negro	7,5	2	11,5				2,5	2,5	1			15	12	0,5					1,5	1,5	0,5										
PM	Oculia	4,9	7,3	24,3					2,3				13,5	1,6																3,4		
PM	Zapata		35	9				3					14	13					19	2,5	2,5					0,5						
PG	Basalte	0,4	28,3	8	0,2				4	0,1			9,9	14	0,1				3,7			1,8	0,1					1,9				
POD	Pluviographe OEDIPE																															
PG	Pluviographe mécanique																															
PM	Pluviomètre																															
SD	Sans données																															

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.1.9. Pluies journalières des postes pluviométriques : octobre 1996.

Num	Nom	Jour																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	Escondida		SD	20,8	30,6	17	3,6																										
2	Sauz Mochó		SD	16,5	24,2	13,5	2,8																										
3	Mezquite		SD	29	38	25	5																										
4	Calderona		SD	25,9	38	21,1																											
5	El Gabitan		10	60,9	26,2	5,6	0,6	1,6																									
6	Oso Negro		8	49	21	4,5	0,5	1,3																									
7	San José		8	49	21	4,5	0,5	1,3																									
8	P. del Huevo		7,8	47,3	20,3	4,3	0,5	1,2																									
9	El Sol		14	48,8	29,1	4,4	1,7																										
10	Carboneras		14	54,7	37,7	6,7	3																										
11	P. Herradero		SD	16,2	39,4	27,8		0,6			0,6						0,6																
12	San Marcos		7,1	42,9	23,2	2,8	1									1																	
13	El Frances																SD																
15	Las Liebres		6	56,2	26	6,3	1,7																										
16	Calabazas		SD	17,1	25	14	3																										
17	Coronela		SD	16,2	23,8	13,3	2,8																										
18	Las Jaulas		SD	32	56	21	9																										
19	Haciendita		SD	26	47	32	21																										
20	Ocuila		SD	14,7	74,8	24,2	6,8										3																
21	Peñoleros		SD	19,2	97,9	31,7	8,8																										
22	Atotonilco		SD	10,4	53,1	17,2	4,8																										
23	Los Angeles		7,8	73,5	34	8,3	2,3																										
24	Cuencame		SD	12,7	64,5	20,9	5,8																										
25	12 de Diciembre		15	47	14	2																											
26	Carboneras bas		15	51	35	6	3																										
27	Carboneras haut		13	47,4	32,7	5,9																											
28	Tulido A		9,2	55	20	3	1									1																	
29	Tulido B		8,9	54	12	2	1									1																	
30	Pastelero A		6	38,6	21,9	4,5	1																										
33	Colorada		6,9	36	20,5	4,2	1,4																										
34	El Viejo		SD	15,9	38,7	27,3		0,5			0,5						0,5																
35	Pastelero		12	35	19,9	4	1																										
PG	Tulido		8,5	51,3	27,8	3,3	1,1									1,2																	
PG	Pastelero		7,1	36,9	21	4,3	1,4																										
PG	Carboneras		11	50,9	35,1	6,3	2,8																										
PG	El Muerto		15,2	52,1	31	4,7	1,8																										
PM	Las Jaulas		SD	17,1	71,5	24,1	6,7																										
PM	Mezquite		SD	26,8	39,4	21,9	4,6																										
POD	El Viejo		SD	14	34	24		0,5			0,5						0,5																
POD	Los Angeles		8,6	80,7	37,4	9,1	2,5																										
POD	Oso Negro		9,5	58,1	25	5,3	0,6	1,5								0,5																	
PM	Ocuila		SD	14,4	73,1	23,7	6,6																										
PM	Zapata		27	36	33	5,5																											
PG	Basalte		9,8	37	21,3	4,4	1,3																										
POD	Pluviographe OEDIPE																																
PG	Pluviographe mécanique																																
PM	Pluviomètre																																
SD	Sans données																																

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.10. Pluies journalières des postes pluviométriques : juin 1997.

Num	Nom	Jour																																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30											
1	Escondida																			15	3						6		27													
2	Sauz Mocho																			21	4						4		20													
3	Mezquite												2				3		4		2						10		19													
4	Calderona											20	2					3			4						10		20													
6	Oso Negro											13	3							10	4								86													
7	San Jose											8	1							20	8					4		58														
8	P. del Huevo											12	2							25	9					3		31														
9	El Sol											7	2							17	4					6		17														
10	Carboneras											7								8	4	1				2		20														
11	P. Herradero																			6	4					5		23	2													
12	San Marcos					2						7						7		2						1		16														
16	Calabazas																						24			6		16														
17	Coronela																						47					15														
18	Las Jaulas																										18		28	1												
19	Haciendita																												38	6												
20	Ocuila											1							13										30	6												
21	Peñoleros																		10										30	4												
22	Atotonilco					1													20		2	2	1				1		26													
24	Cuencame												3,5	16,9			1	1,4									1,3		18,5	6,5												
25	12 de Diciembre																	2				17	2				7		20	2												
26	Carboneras bas											6								5	3	2				1	4		20													
27	Carboneras haut					0,5														8	2	3				1	3		21													
28	Tulido A												6							4							10		20													
29	Tulido B					2							7							4		2					8		17													
30	Pastelero A											5		2					2		6						3		22													
33	Colorada											3		1,5	0,5			1		1	5					2		20	2													
34	El Viejo											5		1				1		1	3					2	4	26	1													
35	Pastelero											5		3				3		2	3					3		24														
PM	Yerbanis					0,5						1,5	3,2	4,5	2,2			2	1,2		1,2								13													
PG	Yerbanis	SD																														2,4		12								
PG	Tulido					2						7							4		2							9		19												
PG	Pastelero					0,4				0,1	0,1		3,3		1,6	0,4	0,3	0,1	1,1	0,3	1,5	5,2	0,1				1,6	0,1	21,3	1,5												
POD	Carboneras					0,3							2,7	0,3	10,5	0,3			2,7		2,1	4,8	0,3			0,3	5,7	0,3	23,4	0,9												
PM	El Muerto	NON INSTALLE																														4		14,7								
PM	Las Jaulas																															10,5		30	2							
PM	Mezquite												1,5						4,6			3					11		19,2													
POD	El Viejo																										4,5	0,5	30	4												
PM	El Viejo					0,7						3,4	3,4		0,8	0,8			1		0,9	1	4,8				0,3															
POD	Oso Negro											12	2	1						9	4			2,5	1		8		83,5													
PM	Ocuila												0,5						14										31	4												
PG	Ocuila					0,1				0,1	0,4	1,2	2,9	0,1	0,1	0,1	0,1		12		0,9	0,9	0,2						30	5												
PG	Atotonilco																		20										25													
PM	Atotonilco												1	6								4,5							25													
PM	Zapata												2,5	0,5	3,3				6,5		20	4,7				4,3		20	0,5													
PM	Basalte	SD																																								
PM	12 Diciembre																															4	13	4,5		5,5		20	3			
PM	Chico	NON INSTALLE																																								
PM	Cuencame					0,1							3,6	17,5				1,1		1,5							1,5		21,2	7,5												
POD	Pluviographe OEDIPE	PG				Pluviographe mécanique				PM				Pluviomètre				SD				Sans données				2 signifie 2.0																

POD Pluviographe OEDIPE

PG Pluviographe mécanique

PM Pluviomètre

SD Sans données

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.11. Pluies journalières des postes pluviométriques : juillet 1997.

Num	Nom	Jour																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	Escondida								11	10	1	7							1	12	24		2								7		
2	Sauz Mochu								3	1	1	8							2	15	15		2								5		
3	Mezquite		4							6	2	10							12		11		10						3	10			
4	Calderona										11	6								1	23		10							5	5		
6	Oso Negro								3		11	5								23	5	20								9			
7	San Jose									1	2	3								17	6	20	4							6			
8	P. del Huevo								4	1	2	6								12	6	20	1							9			
9	El Sol								8	1	1	6							1	17	9	7	3						3	7			
10	Carboneras										1	12							6	57	15	1	1						6		4		
11	P. Herradero										1	10							11	39	8		2						7	13			
12	San Marcos										10	17					2	7	18	14	0,6	5,2							5,2	9,8			
16	Calabazas								24	10	3	12						5	16	19	5									8			
17	Coronela								12		5	22								9	6	6								6			
18	Las Jaulas									4	3	17									5	5											
19	Haciendita									5	5	15									10	5											
20	Ocuila		15						2	2	3	5							1		5	6								1			
21	Pañoleros		15						2,3	3,4	3,3	5											8									5	
22	Atotonilco								1		5	3							2	10	24	4	11							8	7		
24	Cuencame								3	4,5	4,4	6,1							4				5										
25	12 de Diciembre										3	9							11	11	23												
26	Carboneras bas										4	7							7	39	19	2							4	5			
27	Carboneras haut								1		2	9							5	50	21	1							4	1			
28	Tulido A										7	12							9	3	15		5						5	8			
29	Tulido B								3		5	14							6	11	16		5						5	9			
30	Pastelero A								2		4	6							1	31	18	3	12						5	3			
33	Colorada								2	2	2	11							3,3	31	37,7		9		3				5	2			
34	El Viejo								3	3	4	10								13	42	6	2	3					15				
35	Pastelero								3		3	7							1	29	27		11						6	1			
PM	Yerbanis								7,1		19	11							0,5	5	16,5	1											
PG	Yerbanis								3,8		15	10,9							0,3	4,6	16,1					0,3	1		3				
PG	Tulido								3		6	14							8	11	14,5	0,5	4,5						4,5	8,5			
PG	Pastelero								1,6	1,3	3,5	5,8							2,2	20,6	25		10						6	2			
POD	Carboneras								1,2	0,6	1,5	12							9,3	44,7	19,1	0,7	3						6,3	3	0,6		
PM	El Muerto								0,5	0,5	0,8	5,5							4	17,2	11	0,5							2,5	3,9			
PM	Las Jaulas									2,5	9	6									6,5	7,5											
PM	Mezquite		4,5							6	2	10							7		18		9						4	11			
POD	El Viejo																		4	45	4	7											
PM	El Viejo		0,3					1,7	3,7	1,6	6,4	5,6							4,3	1	45	3,5	5	1				0,8	11,3	0,2			
POD	Oso Negro								2,4	5,6	8	7,5							1	25,5	5	20,5	2						0,5	1	0,5		
PM	Ocuila		15,9						3	3,4	4	6,7							1		5,5	6,5							1,5				
PG	Ocuila		15,5						2,8	4,2	4	6,1					0,5	1,2	0,4	5,1	6	0,2	0,1						1,3				
PG	Atotonilco																	2	10	24	4	11											
PM	Atotonilco										3	7,5						2,5	12,5	30		12,5							7,5	9			
PM	Zapata				2,3				4	0,5	4	7,7									15	3								8			
PM	Basalte											9,8										0,7								8,1	8,5		
PM	12 Diciembre					1					3,5	10						10	9	25		0,5											
PM	Chico																					1,8							3,9	1,6			
PM	Cuencame																																
POD	Pluviographe OEDIPE																																
PG	Pluviographe mécanique																																
PM	Pluviomètre																																
SD	Sans données																																

POD Pluviographe OEDIPE

PG Pluviographe mécanique

PM Pluviomètre

SD Sans données

2 signifie 2,0

Pose

ANNEXE VI.12. Pluies journalières des postes pluviométriques : août 1997.

Num	Nom	Jour																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	Escondida							2										33									3		7	8			
2	Sauz Mocho							3		7								2									2		6	3			
3	Mezquite						5		1	2					1	1											4		4	2			
4	Calderona								4	10																	6		5	9			
6	Oso Negro							1	1	6								1										6	3				
7	San Jose							4	2	10							1	2										2	1				
8	P. del Huevo							5	7	7							3	1										1	4				
9	El Sol							4	3	9							7										1		12	1			
10	Carboneras								5	2				1	3		2											3	17	2			
11	P. Herradero							6	1	14					5	1												8	18	9			
12	San Marcos			0,6	0,6	1,7	7,5			2					8														8	1			
16	Calebrazas									5					4		8												16	3			
17	Coronela						1			5					3		5												25	3			
18	Las Jaulas								25	1																							
19	Haciendita								10	5							7															5	
20	Oculita						3	1	5	1					4	6																5	
21	Perifloros									9					5	5																	
22	Atotonilco					1	9	2	3								1													3	10		
24	Cuencame							8		10							3																
25	12 de Diciembre							9		9							2													3			
26	Carboneras bas								4	2				2								1,5						1,5	13	1			
27	Carboneras haut								4	5				3								3						3	17				
28	Tulido A							4							6		5											1			3		
29	Tulido B							4	1						7		1											1		5	2		
30	Pastelero A								2	12				4	1		2													3	4	1	
33	Colorada						1			9				4			6												2	8	7		
34	El Viejo							6		35	2			11	1		8												2	10	5	1	
35	Pastelero							2	2	11				4			4												1	3	4	2	
PM	Yerbanis					2		1	11,5	22	3,6	6		23													3,5	5	4				
PG	Yerbanis					0,6	0,1	1,2	SD	SD	2,5	SD		23	5,4												3,3	SD	4,1	0,7			
PG	Tulido				0,5	0,5	1,5	6,5	1	2,5					9		0,5											1		5	2		
PG	Pastelero							0,3	2,7	5,9				2,5	0,1	0,1	3,4	0,3	0,1								0,2	0,7	3,4	5,2	0,1		
POD	Carboneras					2,4		1,2	3,6	4,5				2,1	3,3	1,5	2,1	0,6				0,9							1,2	18,6	3	1,8	
PM	El Muerto								3	3,7	3,2				0,6	6,3	0,5											0,4	8,5	4,3			
PM	Las Jaulas								13	8																							
PM	Mezquite						1	2	1	3					1	1,7											4,5		4				
POD	El Viejo					1,5		0,5	0,5	12	1			11			6,5												2	10	4		
PM	El Viejo									22,5	2,6						6,1											3,9	6,2	3,2			
POD	Oso Negro						1	1	1	7,5				0,5	0,5	0,5	2											1,5	6,5				
PM	Oculita							2	1,5	5,5	1				4	6																4	
PG	Oculita			0,1	0,2	0,1	3,8	1,5	4,7	1,1	0,1	0,2	0,1	2,8	3,7	0,1			0,1													5,4	
PG	Atotonilco																														3	10	
PM	Atotonilco					1	1	1			5,5																	1	6,5	9,5			
PM	Zapata									7	6			0,5		1,6	1,5			1,5													
PM	Basalte								8,7	1,4	6,2					1,9	1,8											2	5,3	4,4			
PM	12 Diciembre					0,5			6		7,5						5,5												2	1			
PM	Chico										2,6				10,6	0,3	7,2										0,3	1	9	7,8			
PM	Cuencame																																
POD	Pluviographe OEDIPE																																
PG	Pluviographe mécanique																																
SD	Sans données																																
PM	Pluviomètre																																
																										</							

POD Pluviographe OEDIPE

PG Pluviographe mécanique

SD Sans données

PM Pluviomètre

2 signifie 2.0

ANNEXE VI.13. Pluies journalières des postes pluviométriques : septembre 1997.

Num	Nom	Jour																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Escondida						12	11					1				2					6	1,5	22,5							
2	Sauz Mochio						7	13														4	1	17							
3	Mezquite	2					7	28	10				4									3,5	1	13,5							
4	Calderona	3						21	7													2	1	8							
6	Oso Negro							40	10													1	9	13							
7	San Jose							55	11													0,5	5	6,5		0,5					
8	P. del Huevo							48	7													0,5	5	6,5		0,5					
9	El Sol	4						24	13	1	4											2	1	9							
10	Carboneras	3		5			6	7	3	3		4										3,4	1,3	4,7	4,8						
11	P. Herradero	2				8		5	8	2	2		3										15	13							
12	San Marcos						13	8,9	4,3	1,5		3,5										3		11							
16	Calabazas							10	9			3					7						3	10							
17	Coronela				7			5	5			3											5	12							
18	Las Jaulas							21	8														10	10	1						
19	Haciendita							31,5	12														11,3	10,6	3						
20	Ocuila							34	4														8	2,7							
21	Perifleros							13									1						7	2							
22	Atotonilco						8	48		2		1											10	7							
24	Cuencame							22	5													0,5	8	10							
25	12 de Diciembre						7	7	9													1		19							
26	Carboneras bas				6		7	9	3			2										3,4	1,3	4,7	4,6						
27	Carboneras haut				3		9	9	4			3					1					3,9	1,5	5,3	5,3						
28	Tulido A						17	11,5	5,5	2		4										4	1	14							
29	Tulido B						16	11,5	5,5	2		6										4	1	14							
30	Pastelero A				10		5	8		5												7,1	1,5	28,2							
33	Colorada				6		3	8		4		2					1					7	1,5	28,5							
34	El Viejo				2		5	8		2		4										5,5	2,5	20,5	22,5						
35	Pastelero				8		2	12		2		3				1						5	1	19							
PM	Yerbanis						18	11,5														2,5	8,5	15,2	1						
PG	Yerbanis						17,1	10,4														2,9	7,4	16,9							
PG	Tulido						18	12,5	6	2		5										4	1	15							
PG	Pastelero				9,4	0,1	4,7	2,4		3		6										5	1	19,9		0,2					
POD	Carboneras				4,2		7,8	8,4	4,2			4,8										4,8	1,8	6,6	6,6						
PM	El Muerto	0,4				0,3	12,8	10,3	4,6			2,5													14,8						
PM	Las Jaulas							21	7,5															13,7	12,8	3,7					
PM	Mezquite	1,5					10	27	13				1									4	1	14							
POD	El Viejo				3,5		0,5	12				4										5	2	18	20						
PM	El Viejo					4,8		5,6	6,4			3,9										4,5	1,5	17,5	19,5						
POD	Oso Negro							41,5	5,5													1	10,5	14,5		0,5					
PM	Ocuila							28	4														7	4							
PG	Ocuila	0,2					0,5	34	4,1													0,4	6,9	8,3	0,1						
PG	Atotonilco						10	50															10	7							
PM	Atotonilco						10	50	1													7,5	1								
PM	Zapata	1,5		1,5	3	3		9	48																						
PM	Basalte	4,9					6,6	24,6	0,2			0,8														24,9					
PM	12 Diciembre																														
PM	Chico					8		5	8,3			7,1														37,5					
PM	Cuencame																														

POD Pluviographe OEDIPE

PG Pluviographe mécanique

PM Pluimètre

SD Sans données

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.14. Pluies journalières des postes pluviométriques : octobre 1997.

Num	Nom	Jour																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	Escondida												62																				
2	Sauz Mochu												64																				
3	Mezquite												37																	2	2		
4	Calderona												24																				
6	Oso Negro				2,5		0,5	0,5			12,5	17,5																					
7	San Jose				4		0,5	1,5			20	27																		2,5	0,5		0,5
8	P. del Huevo				4		0,5	1			20,5	28																	2,5	0,5		0,5	
9	El Sol				7		1				27	15																					
10	Carboneras				7		9				17	16																					
11	P. Herradero				1		1				21	15																					
12	San Marcos				5		0,5				19	10,5																					
16	Calabazas												53																				
17	Coronela												60																				
18	Las Jaulas				10		3				18	8																			2		
19	Haciendita				3		3				11	14																					
20	Ocuila				7		2				12,9	19,4																		1,1			
21	Peñoleros				6,4		2				11,7	17,6																		1	0,5		
22	Atotonilco				6		1,5				25,5	18																					
24	Cuencame				8		2				14	22																					
25	12 de Diciembre				3		25				19	23																		3			
26	Carboneras bas				9		11				22	21																			1		
27	Carboneras haut				9,5		12				23	22																			1		
28	Tulido A				5		0,5				19	11																		2			
29	Tulido B				5		0,5				19	10,5																		2			
30	Pastelero A				1,8		11,3				15,3	18																		0,9	1,5		
33	Colorada				1		9				12	13,5																		2	3		
34	El Viejo				1		1				18	13																					
35	Pastelero				1,5		11				15	17																		2	3		
PM	Yerbanis				2		9,2				5	26																		2	1		
PG	Yerbanis				0,6		8,8				7,5	17,1																		1,6	1,9		
PG	Tulido				5,5		0,5				20,2	11,3																		2			
PG	Pastelero				0,9		5,6		0,1		7,6	8,9																		0,5	0,8		
POD	Carboneras				9	0,3	11,4				21,3	21,9																		0,9	0,9		
PM	El Muerto				3		4				17	12																		2			
PM	Las Jaulas				11		3,8				16,4	14																			2		
PM	Mezquite												19,3																		2,3		
POD	El Viejo				1,5		1				25,6	12,4																			1,5		
PM	El Viejo				1		1				17,6	12,8																			2,3		
POD	Oso Negro				3,5		0,5		1		17,6	23,9																		2	0,5		0,5
PM	Ocuila				6		1,5				16,4	17																		1			
PG	Ocuila				6,3		1,9				11,6	17,5																		1	0,4		
PG	Atotonilco																																
PM	Atotonilco																																
PM	Zapata				5		6				26	18																			2		
PM	Basalte				3,5		4				18	12,5																			2		
PM	12 Diciembre																																
PM	Chico				3		4				16	11,5																			2,3		
PM	Cuencame																																
POD	Pluviographe OEDIPE																																
PG	Pluviographe mécanique																																
SD	Sans données																																
PM	Pluviomètre																																

POD Pluviographe OEDIPE

PG Pluviographe mécanique

SD Sans données

PM Pluviomètre

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.1.15. Pluies journalières des postes pluviométriques : juin 1998.

Num	Nom	Jour																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Escondida																														
2	S. Mocho																														
3	Mezquite										16														2						
4	Calderona										8														18						
5	Gabilan																														
6	O Negro																														
7	San Jose																														
8	Huevo										6																				
9	El Sol										19														11						
10	Carboneras										13																				
11	Herradero																														
12	San Marcos																								30						
16	Calabazas																														
17	Coronela										11																				
22	Atotonilco										15																				
26	Carboneras haut										19																				
27	Carboneras bas										22																				
28	Tulido A										15														22						
29	Tulido B										17														25						
30	Pastelero A										18																				
33	Colorada										16																				
34	El Viejo										12																				
35	Pastelero B										20																				
PM	Muerto										20																				
PM	Basalto										10																				
PM	Mezquite										14																				
PM	El Viejo																														
PM	Chico																														

POD Pluviographe OEDIPE

2 signifie 2,0

PG Pluviographe mécanique

PM Pluviomètre

SD Sans données

ANNEXE VI.1.16. Pluies journalières des postes pluviométriques : juillet 1998.

Num	Nom	Jour																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Escondida								40														2								19
2	S. Mocho	34							9														5								5
3	Mezquite								8														4								4
4	Calderona								3														3		7						3
5	Gabilan																														
6	O Negro	25														9															
7	San Jose	34																													
8	Huevo	23							9																						1
9	El Sol	2							7														5								6
10	Carboneras	29							8														17								12
11	Herradero	43							10														1								10
12	San Marcos																						15								7
16	Calabazas								50														8								5
17	Coronela	16							12														7								14
22	Atotonilco	28							6							4							6								5
26	Carboneras haut	26							10														22								8
27	Carboneras bas	26							5														24								9
28	Tulido A								10														4								2
29	Tulido B								10														2								3
30	Pastelero A	29							7														8								13
33	Colorada	21							6														5								16
34	El Viejo	13							10							4							8								9
35	Pastelero B	27							8														7								14
PM	Muerto	30							9														11								13
PM	Basalto	20																													14
PM	Mezquite								7								1						3								Tr
PM	El Viejo								10														6								7
PM	Chico																														

POD Pluviographe OEDIPE 2 signifie 2,0
 PG Pluviographe mécanique
 PM Pluviomètre
 SD Sans données

ANNEXE VI.1.17. Pluies journalières des postes pluviométriques : août 1998.

Num	Nom	Jour																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	Escondida					9	12			15								46	4						1		5	18				
2	S. Mocho					3	11			9								137	16								2	5				
3	Mezquite					1	25			42								25	4						8			7				
4	Calderona						58			57								40			2				5			42				
5	Gabilan																															
6	O Negro									74																		41				
7	San Jose									89																		64				
8	Huevo					3	20			14								52	7								15	6				
9	El Sol					3	6			40								25	21							1	4	2				
10	Carboneras				1	4	5			35								45	9	11							10	9				
11	Herradero					14	2			21								47	9							9	6	10				
12	San Marcos					11	11			67								23	3							9	6	6				
16	Calabazas					1	5			16								40	5							4	14	12				
17	Coronela					11	5			13								45	4							13	5	13				
22	Atotonilco					6	11			18								55	2							5	4	6				
26	Carboneras haut					3	6	6		32								64	8								8	5				
27	Carboneras bas					3	5	5		28								46	10								6	6				
28	Tulido A				1	3	12			53								25	3								3	7	6			
29	Tulido B					6	9			56								29	3								1	3	4			
30	Pastalero A					5	8			11								86	2								5	14				
33	Colorada					22	3			12								80	10								16	9				
34	El Viejo				1	25	8			18								88	12						2		11	7				
35	Pastalero B					4	6			11								87	4								1	4	12			
PM	Muerto				7	5	8			38								47	11							2	1	4	6			
PM	Basalto					3	13			19								58	4								2	1	7			
PM	Mezquite					3	24			39								28	5							5	4	7				
PM	El Viejo				4	20	7			16								81	11								16					
PM	Chico					18	5			9								95	8								5	15				

POD Pluviographe OEDIPE
 PG Pluviographe mécanique
 PM Pluviomètre
 SD Sans données

2 signifie 2,0

ANNEXE VI.1.18. Pluies journalières des postes pluviométriques : septembre 1998.

Num	Nom	Jour																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Escondida		10	37					7																						
2	S. Mochó		5	47					6																						
3	Mezquite	5	3	75	1			1	2																					8	
4	Calderona	3		44																										39	
5	Gabilán																														
6	O Negro																														
7	San José																														
8	Huevo		7	24																											15
9	El Sol	4		44	31				3																						18
10	Carboneras	3		48					15																						
11	Herradero	7		50					10																						
12	San Marcos	5		46	25				1																						
16	Calabazas		6	42					7																						
17	Coronela	7		50				18	5																						4
22	Atotonilco		6	33					6																						
26	Carboneras haut	7		47	1			3	1																						
27	Carboneras bas	4		50	5			3	2																						
28	Tulido A	2		43	44				1																						
29	Tulido B	3		42	39				1																						
30	Pastelero A	4		45				8	2														4								
33	Colorada	7		47					6																						
34	El Viejo	8		58					15		2																				
35	Pastelero B	6		42				8	1																						
PM	Muerto	5		48	8			1	3																						
PM	Basalto	9		33																											
PM	Mezquite	5	4	68	2			1	3																						
PM	El Viejo	16		55																											
PM	Chico	7		57				4			20																				

POD Pluviographe OEDIPE 2 signifie 2,0
 PG Pluviographe mécanique
 PM Pluviomètre
 SD Sans données

ANNEXE VI.19. Pluies journalières des postes pluviométriques : octobre 1998.

Num	Nom	Jour																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	Escondida		62													3															3	
2	S. Mocho		35																												4	
3	Mezquite		17													2											11					
4	Calderona		6													2							2									
5	Gabilan								160																							
6	O Negro																															
7	San Jose								70																							
8	Huevo		17													2															3	
9	El Sol		12													16											15					
10	Carboneras		25													12															7	
11	Herradero		29													12															12	
12	San Marcos		27													2							2								28	
16	Calabazas		64													14															6	
17	Coronela		42													10															8	
22	Atotonilco		27													20															9	
26	Carboneras haut		12													5															2	
27	Carboneras bas		10													10															8	
28	Tulido A		22													2											5				16	
29	Tulido B		15																							1					30	
30	Pastelero A		15													6										1					6	
33	Colorada		23													10															5	
34	El Viejo		21													20															6	
35	Pastelero B		13													9															4	
PM	Muerto		12																													
PM	Basalto		32																													
PM	Mezquite		17																													
PM	El Viejo		24																													
PM	Chico		17																													

POD Pluviographe OEDIPE 2 signifié 2,0
 PG Pluviographe mécanique
 PM Pluviomètre
 SD Sans données

ANNEXE VI.2.1. Evaporation journalière en 1996 au bac classe A et au bac flottant (site Zapata) en mm.

Bac classe A

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31						
Janvier	SD																			3,9	4,1	3,5	3,8	4,0	10,8	10,2	2,5	2,2	8,9	8,9	7,4	5,0					
Février	7,4	6,7	3,6	4,0	2,3	6,3	4,0	6,2	6,1	6,7	7,4	3,7	17,7	11,7	7,9	6,9	6,0	6,4	5,7	9,8	5,8	11,8	11,4	8,2	7,8	5,9	8,6	7,5	6,2								
Mars	5,1	6,0	7,5	11,8	10,8	10,4	4,3	5,7	5,5	6,5	7,8	10,8	8,7	8,5	9,8	10,1	8,8	11,1	10,2	6,8	8,7	8,7	9,5	10,0	8,7	10,3	10,4	10,2	8,9	7,6	7,9						
Avril	7,2	9,1	8,4	10,6	6,9	10,5	5,6	4,0	5,1	6,8	6,6	11,1	18,0	9,0	8,8	7,4	8,7	7,2	8,5	7,7	9,3	8,6	7,9	7,4	5,8	6,1	6,8	6,9	7,5	10,4							
Mai	8,4	9,3	9,1	15,0	11,8	7,7	9,9	10,7	11,0	8,9	8,9	7,6	6,6	14,8	11,8	11,9	9,3	10,5	10,1	9,5	11,5	9,0	13,9	15,7	12,1	12,6	12,3	9,5	9,7	12,9	4,6						
Juin	7,8	6,9	6,3	8,8	9,4	11,6	9,9	10,4	9,6	9,1	8,1	8,3	2,1	5,3	5,0	4,7	5,3	7,4	8,8	10,0	9,5	9,9	8,4	9,0	3,5	4,3	5,4	10,6	6,3	7,9							
Juillet	10,8	6,2	9,7	6,5	10,3	3,6	6,1	5,2	4,7	5,3	5,3	5,9	6,9	7,8	4,9	8,7	10,6	7,5	10,1	10,7	7,3	7,6	8,8	3,9	4,1	6,9	12,8	11,1	11,4	11,8	7,9						
Août	7,8	3,3	8,3	6,8	7,1	7,6	5,9	5,0	5,6	6,5	6,6	8,7	3,4	12,8	7,6	5,1	7,1	7,8	5,8	5,0	5,2	6,4	5,5	5,3	5,0	5,7	4,0	5,6	5,2	5,4	5,3						
Septembre	6,2	7,0	6,0	5,0	6,0	3,9	2,9	7,6	5,6	5,6	6,2	6,0	2,4	4,0	4,6	7,7	6,9	6,4	7,0	8,1	4,0	5,0	7,5	2,9	2,9	4,8	3,7	4,8	4,6	4,3							
Octobre	7,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,3	5,0	4,9	2,5	4,3	3,7	3,5	2,9	3,9	1,8	6,6	4,5	3,8	7,6	6,2	6,6	6,1	6,6	4,8	6,1	5,1	6,6	3,8	4,1	4,2						
Novembre	4,4	5,1	6,8	6,7	5,5	6,5	4,9	4,4	5,7	7,1	6,7	4,9	5,8	5,4	6,0	5,3	5,9	5,3	7,6	4,6	4,6	6,7	5,9	5,5	4,8	3,6	2,5	8,0	5,6	5,0							
Décembre	5,3	5,7	2,7	3,1	0,6	1,9	2,1	4,7	8,0	3,1	2,9	1,3	4,5	4,1	4,3	4,8	4,5	4,9	4,8	5,1	3,5	3,7	5,7	5,6	5,2	5,3	4,9	5,1	3,7	4,4	5,2						

Bac flottant

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Janvier	SD																		4,5	4,8	2,8	8,0	5,0	6,0	7,5	3,5	4,5	7,0	3,0	4,5	7,5
Février	6,0	2,0	7,5	6,5	4,0	5,0	4,0	4,5	3,0	5,0	2,0	1,0	4,0	6,5	6,5	6,0	6,0	5,0	5,0	5,5	5,5	6,0	4,0	7,0	8,5	5,5	7,0	7,0	5,5		
Mars	4,5	7,0	5,0	10,0	10,0	14,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,5	8,0	9,0	8,0	5,5	5,5	6,0	6,0	5,0	4,0	7,0	8,0	10,0	10,0	7,0	9,0	9,0	7,0	8,0	7,0	6,0
Avril	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	6,0	5,0	5,0	10,0	9,0	10,0	10,0	9,0	8,0	9,0	10,0	11,0	11,0	11,0	9,0	8,0	7,0	6,0	8,0	5,0	7,0	6,0	6,0	8,0	8,0	
Mai	8,0	8,0	9,0	10,0	11,0	11,0	9,0	9,0	11,0	9,0	8,0	10,0	8,0	8,5	9,0	8,5	9,5	10,0	9,5	10,0	10,0	8,3	10,0	13,0	14,0	13,0	9,5	10,0	3,0	6,0	4,0
Juin	5,0	7,0	10,0	10,0	8,0	11,0	11,0	11,0	10,0	10,0	7,5	5,0	2,1	5,3	5,0	4,7	5,5	9,0	8,6	10,0	9,3	13,0	8,0	8,8	1,0	5,0	5,4	9,0	8,0	7,8	
Juillet	9,0	8,0	8,0	8,0	10,0	3,6	6,0	5,2	7,0	5,3	5,3	4,0	8,5	7,7	4,9	9,0	8,0	7,0	10,0	9,0	8,0	7,0	8,0	3,9	12,0	10,0	11,0	10,9	14,0	13,0	11,0
Août	7,0	3,3	6,0	8,0	6,0	10,0	5,9	8,0	5,6	8,0	9,0	6,0	2,0	12,5	7,5	8,0	10,0	7,7	5,8	5,0	5,2	6,3	5,5	5,3	10,0	10,0	6,0	5,0	4,0	5,4	5,3
Septembre	6,2	6,9	6,0	5,0	6,0	3,9	2,9	7,5	5,6	5,6	6,2	6,0	2,4	4,0	4,6	7,6	6,8	6,3	6,9	8,0	5,0	4,0	7,4	16,0	4,0	5,0	6,0	5,5	6,0	5,0	
Octobre	5,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,3	5,0	4,9	2,5	4,3	3,7	3,5	2,9	3,9	1,8	4,0	7,0	8,0	8,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Novembre	4,0	5,0	6,0	6,0	7,0	7,0	6,0	6,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	9,0	9,0	9,0	10,0	9,0	8,0	8,0	7,0	8,0	6,0	6,0	6,0	3,6	2,5	7,9	5,6	5,0	
Décembre	5,3	4,0	2,0	4,0	1,0	3,0	2,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,0	4,0	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

SD : Sans données

ANNEXE VI.2.2. Evaporation moyenne mensuelle journalière dans le ranch Atotonilco.

Année 1996		Bac classe A				Bac flottant
Station climatique	Cuencame	Las Jaulas	Yerbanis	Zapata	El Viejo	Zapata
Altitude (m)	1590	1740	1900	1960	2150	1950
Janvier	1,18	6,3	5,3	5,8	6	5,3
Février		5,9	6,3	6,3	6,5	5,4
Mars		7,8	8,3	8	9,9	7,3
Avril	5,46	8,8	9,9	8,5	11,1	7,9
Mai	7,96	10	11,3	10,8	11,4	9,1
Juin	7,42	8,2	8,3	8,2	9,2	8,3
Juillet	6,85	7,5	7,4	8,5	8	8,4
Août	4,79	6,2	5,7	6,4	6,8	7,2
Septembre	4,96	3,6	4,5	5,2	4,6	5,1
Octobre	3,83	3,6	4,8	6,5	5,4	6,4
Novembre	3,62	3,6	5,2	5,7	5,2	5,6
Décembre	2,82	3	3,5	4,2	3	4,1
Moyenne journalière	4,9	6,2	6,7	7,0	7,3	6,7
Total annuel (mm)	1784	2266	2449	2558	2649	2436

Année 1997		Bac classe A				Bac flottant
Station climatique	Cuencame	Las Jaulas	Yerbanis	Zapata	El Viejo	Zapata
Altitude (m)	1590	1740	1900	1960	2150	1950
Janvier	3,24	4,02	4,66	5,2	4,67	5
Février	4,4	5,43	6,66	7	8,84	6,8
Mars	4,47	5,45	6,43	5,7	6,44	6,3
Avril	5,34	7,05	7,38	8,2	9,44	6,6
Mai	6,9	8,13	7,48	8,3	7,58	6,7
Juin	7,17	8,02	8,03	8,4	7,82	6,8
Juillet	6,01	6,25	7,25	7,3	7,4	9,6
Août	6,32	7,2	6,9	7,7	6,73	10,1
Septembre	4,6	5,8	6,15	6,7	5,74	8,7
Octobre	3,84	4,85	5,48	6,04	5,12	5,87
Novembre	3,49	5,67	4,67	5,3	4,83	7,71
Décembre	3,5	3,77	4,7	5,4	5,28	9,11
Moyenne journalière	4,9	6,0	6,3	6,8	6,7	7,4
Total annuel (mm)	1808	2185	2312	2478	2437	2723

ANNEXES DU CHAPITRE 7

Ruissellement, transports solides et humidités des sols des parcelles	: VII.1.1. à VII.1.2.
Topographies des retenues	: VII.2.1. à VII.2.5.
Hyétogrammes centrés des postes	: VII.3.1. à VII.3.7.
Pluies moyennes des bassins versants	: VII.4.1. à VII.4.5.
Caractéristiques des crues des bassins versants	: VII.5.1. à VII.5.2.
Hydrogrammes types des années 1996 et 1997	: VII.6.1. à VII.6.4.

Annexe VII.1.1. Ruissellement et transports solides par événement sur les parcelles expérimentales.

SITE CARBONERAS													
PARCELLES		1			2			5			6		
Superficies m²		61			62			59			62		
Date	HA mm	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha
1/6/96	8,6	0,6	6,6	0,0	0,1	1,2	0,0	1,4	15,7	0,0	1,3	15,6	0,0
15/6/96	23,0	4,4	19,2	96,2	3,0	12,9	79,1	7,3	31,6	466,2	14,9	64,9	625,1
14/7/96	8,8	0,5	6,1	4,6	0,7	7,4	3,3	0,7	7,5	11,3	0,4	4,8	8,4
7/8/96	28,1	7,5	26,8	346,9	10,7	38,0	1321,2	12,9	45,9	2622,6	16,8	59,8	1616,5
13/8/96	19,2	4,9	25,7	49,4	4,6	23,7	83,3	7,8	40,4	480,5	13,0	67,9	548,8
14/8/96	10,1	0,7	7,3	7,4	0,7	6,7	12,4	1,2	11,5	71,8	1,9	19,3	82,0
23/8/96	15,1	2,5	16,7	24,7	1,2	7,9	13,8	3,8	25,0	121,2	6,4	42,1	91,1
24/8/96	15,7	1,0	6,6	5,6	1,0	6,4	5,3	3,1	19,9	58,9	3,4	21,7	45,6
27/8/96	4,5	0,8	18,4	14,5	1,0	22,7	19,0	0,1	1,1	2,0	0,1	1,8	1,5
28/8/96	5,6	0,3	5,0	3,8	0,2	3,8	2,7	1,5	26,1	63,3	2,0	34,8	43,5
30/8/96	15,7	8,5	54,1	77,5	3,0	19,3	15,5	7,0	44,5	111,1	2,9	18,4	80,4
31/8/96	21,0	3,4	16,0	20,7	0,9	4,5	2,6	2,0	9,5	8,2	3,5	16,7	13,5
2/9/96	25,3	8,6	33,8	122,9	3,9	15,3	35,5	13,7	54,0	137,1	15,3	60,3	225,0
7/9/96	8,0	5,8	72,6	98,6	3,8	48,3	65,7	6,2	77,9	195,8	-	-	277,2
13/9/96	7,2	0,1	1,8	1,8	0,1	0,7	0,4	0,6	7,9	1,4	0,5	7,2	1,8
18/9/96	21,8	2,5	11,5	19,8	1,1	4,8	7,3	3,2	14,8	150,9	3,9	17,9	32,9
TOTAL ANNUEL	465,2	52,2	11,2	894,2	35,8	7,7	1667,2	72,2	15,5	4502,1	86,4	18,6	3693,2

SITE EL VIEJO													
PARCELLES		3			4			7			8		
Superficies m²		65			65			53			68		
Date	HA mm	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha	L.R. mm	C.R. %	T.S. kg/ha
30/6/96	5	0,1	2,2	18,7	0,4	8,6	1,7	0,3	6,4	60,2	0,4	7,0	17,5
11/7/96	47,5	14,7	30,8	1078,3	7,2	15,2	4629,3	24,5	51,7	4009,1	15,2	32,1	2593,8
14/7/96	13	0,3	1,9	29,7	0,0	0,2	0,4	0,4	3,2	174,7	0,2	1,6	34,6
7/8/96	23	12,1	52,4	3506,0	5,7	24,8	853,2	15,6	67,7	4075,4	14,6	63,3	4013,0
13/8/96	27,5	10,6	38,5	1017,3	3,1	11,4	158,4	10,5	38,4	1772,9	8,5	30,8	2289,7
14/8/96	22,5	4,5	20,2	436,0	1,3	6,0	67,9	4,5	20,1	759,8	3,6	16,1	981,3
20/8/96	31	15,6	50,5	1507,3	4,1	13,1	194,0	15,6	50,2	2563,8	11,6	37,5	2102,0
23/8/96	18,5	4,4	23,6	66,3	0,6	3,5	10,4	6,9	37,4	283,4	3,1	16,6	133,9
24/8/96	17	1,2	6,9	8,0	0,1	0,4	1,7	4,2	24,5	80,9	0,8	4,8	24,0
28/8/96	6	0,1	1,0	1,3	0,1	0,8	1,5	0,9	15,5	46,2	0,2	3,2	17,8
30/8/96	8	0,9	11,8	4,6	0,5	6,0	6,8	1,1	14,3	75,4	1,6	19,8	27,7
31/8/96	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	3,4	2,1	0,1	0,5	1,2
2/9/96	17,5	10,3	58,7	491,2	4,7	26,6	151,9	15,8	90,3	615,6	10,9	62,2	527,9
3/9/96	9	1,3	14,0	43,8	0,0	0,0	0,0	3,7	40,7	248,3	1,0	11,6	119,8
7/9/96	4,5	0,5	12,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,9	20,7	57,1	0,2	3,3	18,2
12/9/96	9	1,2	13,1	15,5	4,3	48,1	69,8	2,0	21,9	34,7	0,7	7,8	11,9
13/9/96	12,5	3,7	29,4	14,5	0,5	4,1	2,9	6,3	50,4	21,5	2,5	20,2	15,1
18/9/96	15	1,4	9,4	3,2	0,2	1,3	1,0	2,6	17,5	7,1	0,6	4,1	4,0
25/9/96	14,5	3,8	25,9	30,7	1,3	9,2	6,6	8,1	56,0	128,1	4,2	29,1	48,0
TOTAL ANNUEL	554,5	86,5	15,6	8277,3	34,1	6,2	6157,6	124,7	22,5	15016,1	80,0	14,4	12981,4

H.A. Hauteur totale de l'averse

C.R. : Coefficient de ruissellement

L.R. : Lane ruisselée

T.S. : Transport solide

Annexe VII.1.2. Humidités à 3 profondeurs du sol près des parcelles expérimentales.

SITE CARBONERAS		Humidités pondérales en pourcentages					
Date	PARCELLE 1			PARCELLE 6			
Profondeur (cm)	0-5	5-10	10-15	0-5	5-10	10-15	
22/08/96	15,4	15,8	17,4	16,4	17,7	17,2	
25/08/96	31,8	28,8	25,9	27,8	26,1	25,3	
26/08/96	23,2	26,5	26,3	19,5	20,1	19,6	
27/08/96	26,4	28,0	28,8	17,7	16,4	16,7	
28/08/96	21,4	22,3	25,0	19,7	18,0	18,4	
29/08/96	26,4	26,0	27,7	17,6	18,4	21,3	
01/09/96	30,0	30,4	30,1	20,7	19,5	19,4	
03/09/96	28,7	30,9	31,7	19,5	19,1	20,2	
06/09/96	27,0	29,8	29,0	14,2	14,8	13,8	
10/09/96	32,7	21,4	26,0	14,9	13,8	13,3	
13/09/96	24,3	25,8	23,5	18,5	17,7	22,4	
16/09/96	28,1	24,7	28,5	13,3	18,3	21,9	
19/09/96	27,3	31,1	35,5	20,7	19,8	22,0	
22/09/96	27,6	29,2	28,5	13,8	20,4	21,7	
26/09/96	17,3	19,9	25,0	13,4	15,6	18,2	
28/09/96	19,4	21,3	23,5	14,1	15,1	20,3	
08/10/96	28,6	32,0	35,8	30,6	22,2	28,4	
10/10/96	29,7	29,1	32,0	22,9	22,0	27,7	
16/10/96	20,1	23,2	25,4	20,7	23,6	24,6	
24/10/96	11,0	11,0	15,4	14,4	15,3	17,0	
05/11/96	0,9	6,0	8,5	4,7	13,2	15,2	

SITE EL VIEJO		Humidités pondérales en pourcentages					
Date	PARCELLE 3			PARCELLE 7			
Profondeur (cm)	0-5	5-10	10-15	0-5	5-10	10-15	
27/7/96	10,7	12,5	14,0	7,5	6,5	7,3	
1/8/96	9,3	10,5	8,3	6,3	6,7	4,7	
11/8/96	15,3	9,0	-	12,1	14,2	9,4	
19/8/96	25,9	16,0	22,1	12,7	13,7	10,0	
22/8/96	22,7	20,1	24,3	20,2	17,8	16,9	
25/8/96	36,7	30,3	28,7	23,6	19,4	19,8	
26/8/96	26,4	25,4	25,6	19,3	17,5	17,1	
27/8/96	18,1	20,7	20,8	16,0	15,4	16,3	
28/8/96	19,8	18,1	17,3	11,6	12,0	12,0	
29/8/96	22,3	22,7	24,0	16,5	16,3	16,3	
1/9/96	28,8	27,0	28,8	18,1	17,1	19,4	
4/9/96	27,7	26,8	25,7	27,5	24,0	21,2	
6/9/96	24,3	22,3	21,3	22,7	18,8	18,7	
8/9/96	23,1	24,8	24,4	15,0	15,5	16,5	
10/9/96	20,2	17,1	19,4	11,7	11,5	12,0	
13/9/96	23,1	21,9	17,0	12,8	14,2	14,1	
16/9/96	21,1	19,5	20,3	12,1	13,1	17,0	
19/9/96	29,8	24,7	24,0	18,8	15,7	17,2	
22/9/96	20,8	23,6	22,7	15,0	15,6	16,7	
26/9/96	19,4	22,0	21,4	22,5	16,1	17,7	
28/9/96	20,2	25,8	24,2	11,6	14,4	15,1	
8/10/96	34,9	28,2	31,7	19,3	20,4	19,4	
10/10/96	18,7	21,0	21,0	14,0	13,0	15,8	
16/10/96	13,1	16,4	19,9	9,7	12,8	16,2	
24/10/96	7,9	17,0	12,2	11,3	6,5	10,6	
5/11/96	5,8	6,8	10,7	4,3	7,3	8,4	

Annexe VII.2.1. Barèmes cotes-surfaces et cotes-volumes des retenues.

Site de El Viejo

Années	1996		1997		Années	1996		1997	
Cote	Volume	Superficie	Volume	Superficie	Cote	Volume	Superficie	Volume	Superficie
cm	m ³	m ²	m ³	m ²	cm	m ³	m ²	m ³	m ²
0	0	0			132	2180	3100	2150	3100
2	0	0			142	2500	3330	2470	3330
12	0	0			152	2850	3400	2820	3400
22	7	360	0	0	162	3230	3910	3200	3910
32	70	840	40	840	172	3640	4230	3600	4230
42	170	1160	140	1160	182	4080	4570	4040	4570
52	300	1460	270	1460	192	4550	4850	4520	4850
62	460	1740	430	1740	202	5050	5110	5010	5110
72	650	1970	620	1970	212	5570	5380	5540	5380
82	860	2180	830	2180	222	6120	5720	6090	5720
92	1090	2390	1050	2390	232	6720	6110	6680	6110
102	1330	2580	1300	2580	242	7350	6560	7320	6560
112	1600	2750	1600	2750	252	8030	7150	8000	7150
122	1880	2920	1850	2920					

Cote de déversement : 2,32 m

Site de El Tullido

Années	1996-1997		Années	1996-1997	
Cote	Volume	Superficie	Cote	Volume	Superficie
cm	m ³	m ²	cm	m ³	m ²
0	0	0	150	237	2725
10	17	335	160	2650	2870
20	65	600	170	2950	3020
30	135	825	180	3260	3175
40	230	1045	190	3580	3320
50	345	1250	200	3920	3470
60	480	1445	210	4275	3610
70	635	1640	220	4645	3755
80	805	1790	230	4875	3850
90	990	1920	240	5030	3920
100	1190	1040	250	5430	4135
110	1400	2160	260	5850	4375
120	1620	2290	270	6295	4620
130	1860	2440	280	6765	4850
140	2110	2585	290	7260	5080

Cote de déversement : 2,26 m

Annexe VII.2.1. Suite.

Site de El Pastelero

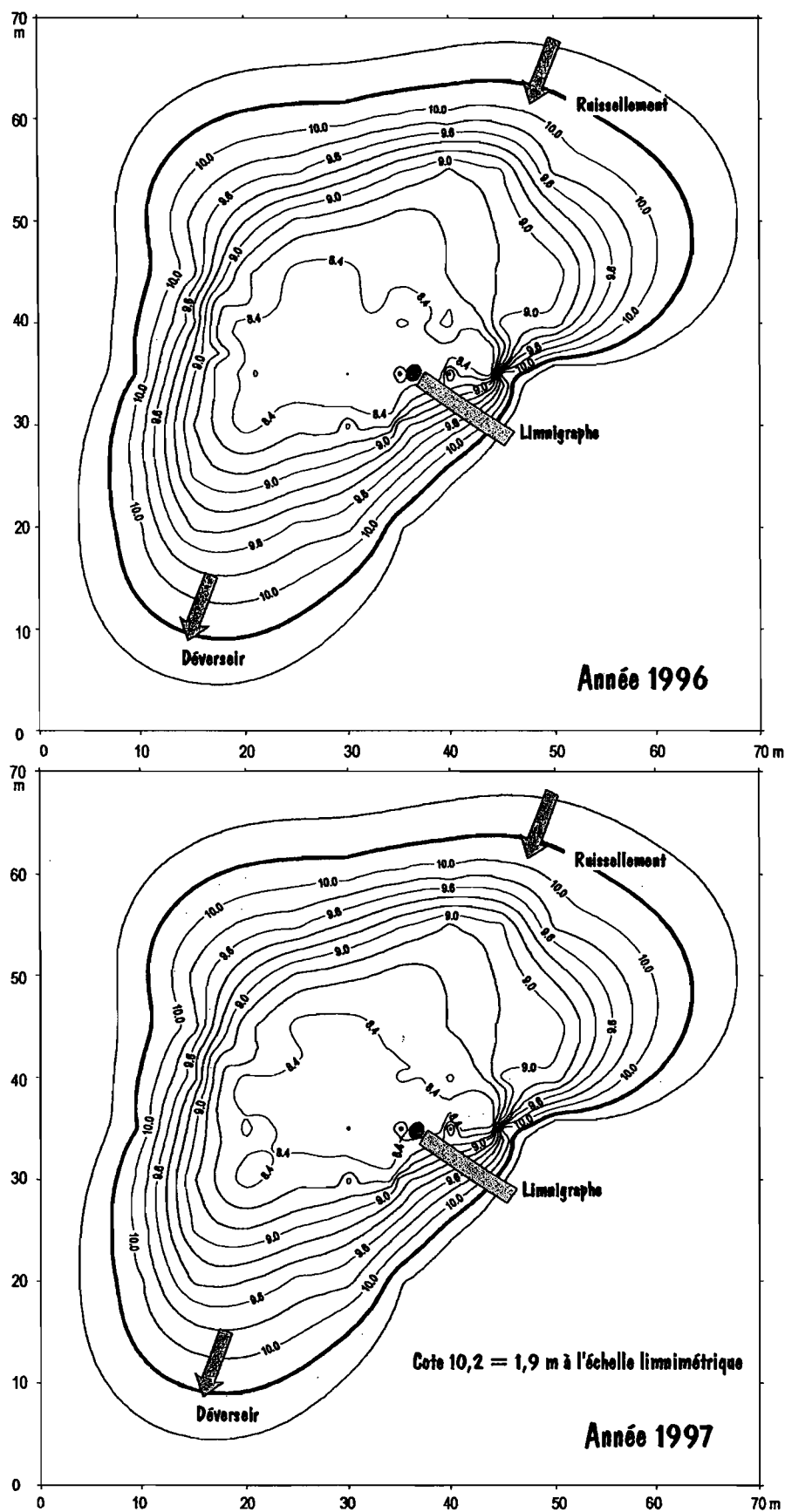
Années	1996		1997		Années	1996		1997	
Cote	Volume	Superficie	Volume	Superficie	Cote	Volume	Superficie	Volume	Superficie
cm	m ³	m ²	m ³	m ²	cm	m ³	m ²	m ³	m ²
0	0	0			170	3680	3630	3440	3630
10	0	0			180	4050	3750	3810	3750
20	10	260			190	4430	3860	4190	3860
30	50	620			200	4820	3870	4580	3870
40	150	1310			210	5220	4070	4980	4070
50	300	1710	60	240	220	5640	4170	5400	4170
60	490	2000	250	2000	230	6060	4270	5820	4270
70	700	2220	460	2220	240	6490	4370	6250	4370
80	930	2420	690	2420	250	6930	4470	6690	4470
90	1180	2580	940	2580	260	7380	4570	7140	4570
100	1450	2730	1210	2730	270	7850	4690	7610	4690
110	1730	2870	1490	2870	280	8320	4800	8080	4800
120	2020	3000	1780	3000	290	8810	4910	8570	4910
130	2330	3130	2090	3130	300	9300	5030	9060	5030
140	2650	3260	2410	3260	310	9810	5150	9570	5150
150	2980	3380	2740	3380	320	10330	5260	10090	5260
160	3320	3510	3080	3510	330	10860	5380	10620	5380

Site de El Muerto

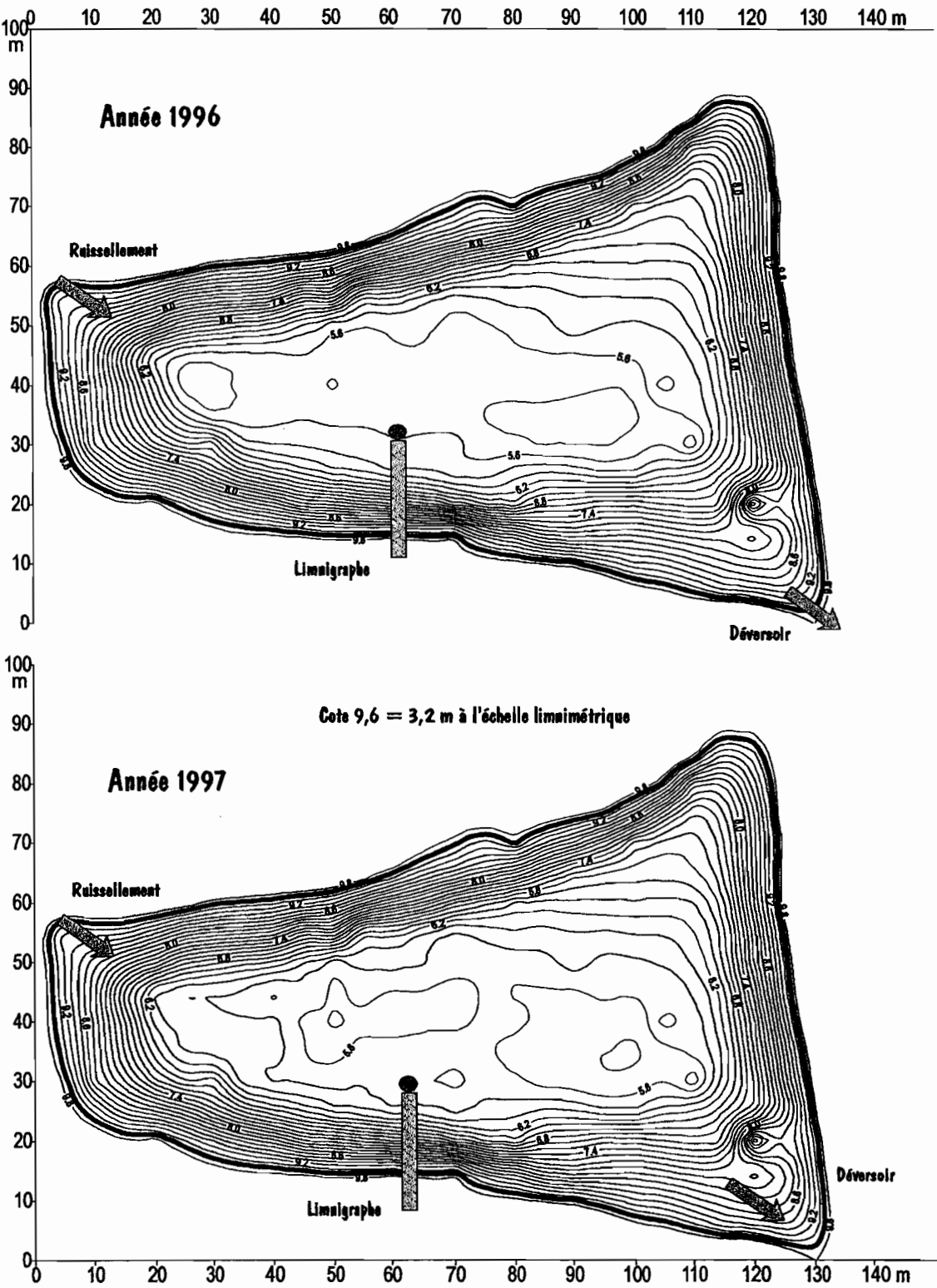
Années	1996		1997		Années	1996		1997	
Cote	Volume	Superficie	Volume	Superficie	Cote	Volume	Superficie	Volume	Superficie
cm	m ³	m ²	m ³	m ²	cm	m ³	m ²	m ³	m ²
0,0	0	0			140	835	1095	815	1095
10,0	5	105			150	950	1160	930	1160
20,0	20	190	0		160	1070	1220	1050	1220
30,0	44	290	24	290	170	1190	1285	1175	1285
40,0	77	380	57	380	180	1325	1345	1305	1345
50,0	120	475	100	475	190	1460	1400	1440	1400
60,0	170	555	152	555	200	1605	1450	1585	1450
70,0	230	625	211	625	210	1750	1480	1730	1480
80,0	295	695	277	695	220	1900	1500	1880	1500
90,0	370	765	350	765	230	1050	1515	2030	1515
100,0	450	835	430	835	240	2200	1530	2180	1530
110,0	535	900	516	900	250	2360	1550	2337	1550
120,0	630	970	610	970					
130,0	730	1030	710	1030					

Cote de déversement : 1,9 m

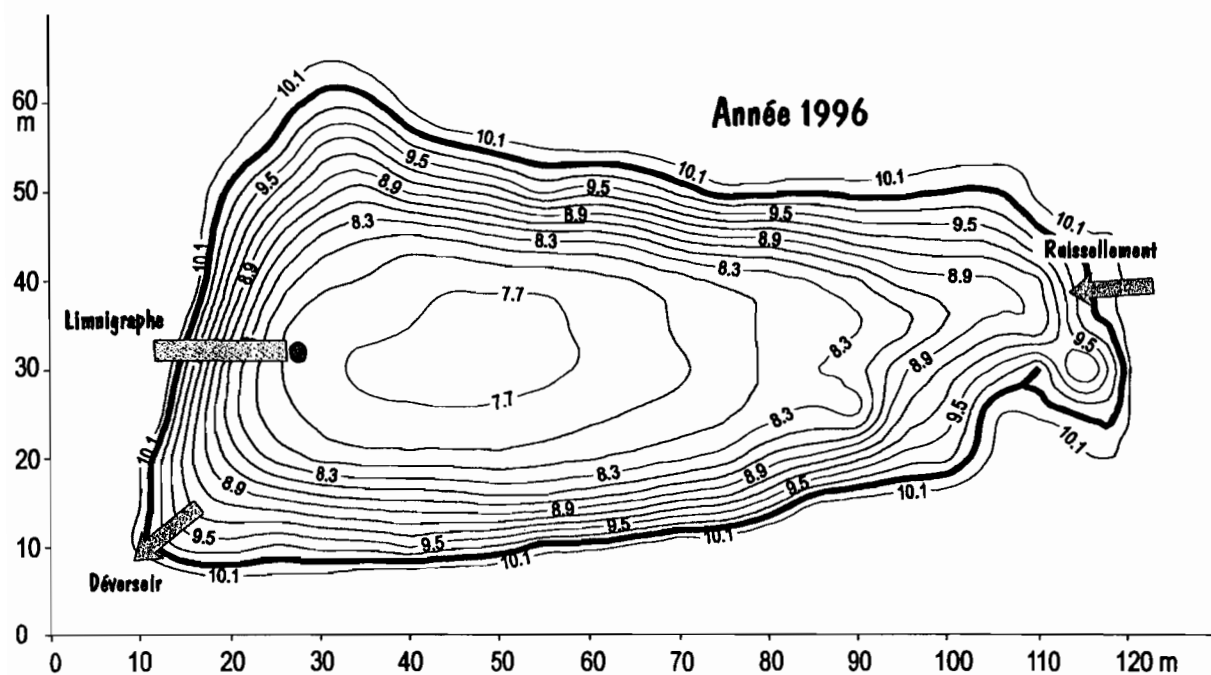
Annexe VII.2.2. Topographies de la retenue de El Muerto pour les années 1996 et 1997.



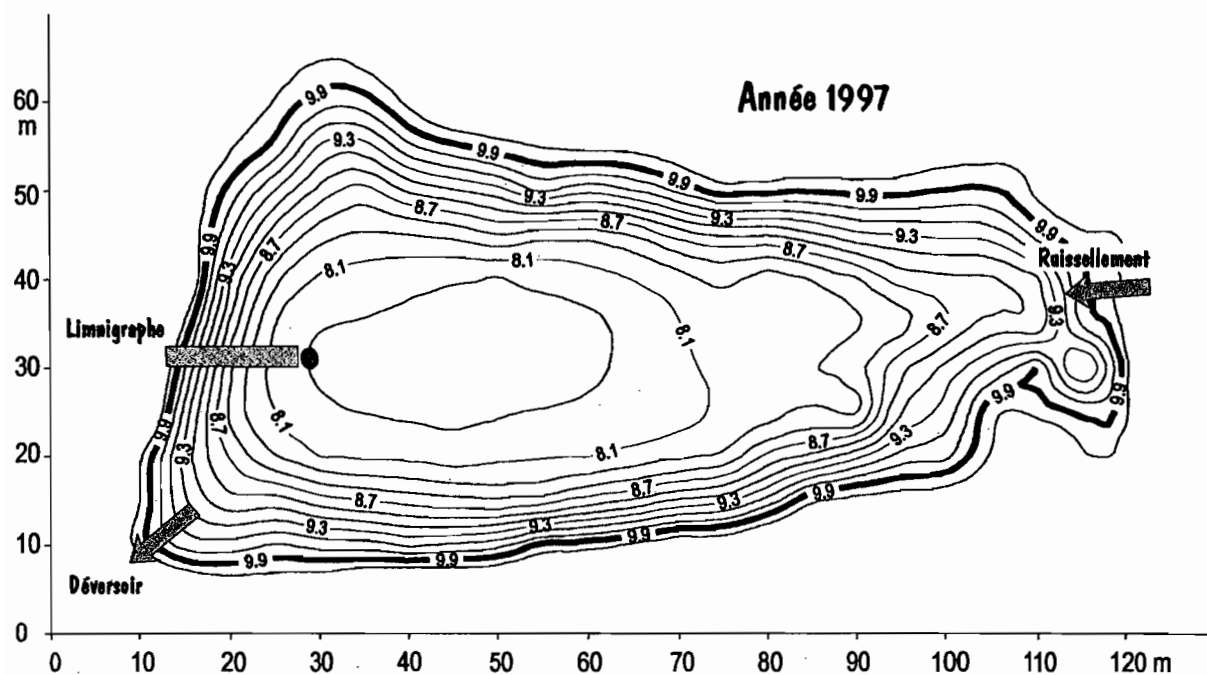
Annexe VII.2.3. Topographies de la retenue de El Pastelero pour les années 1996 et 1997.



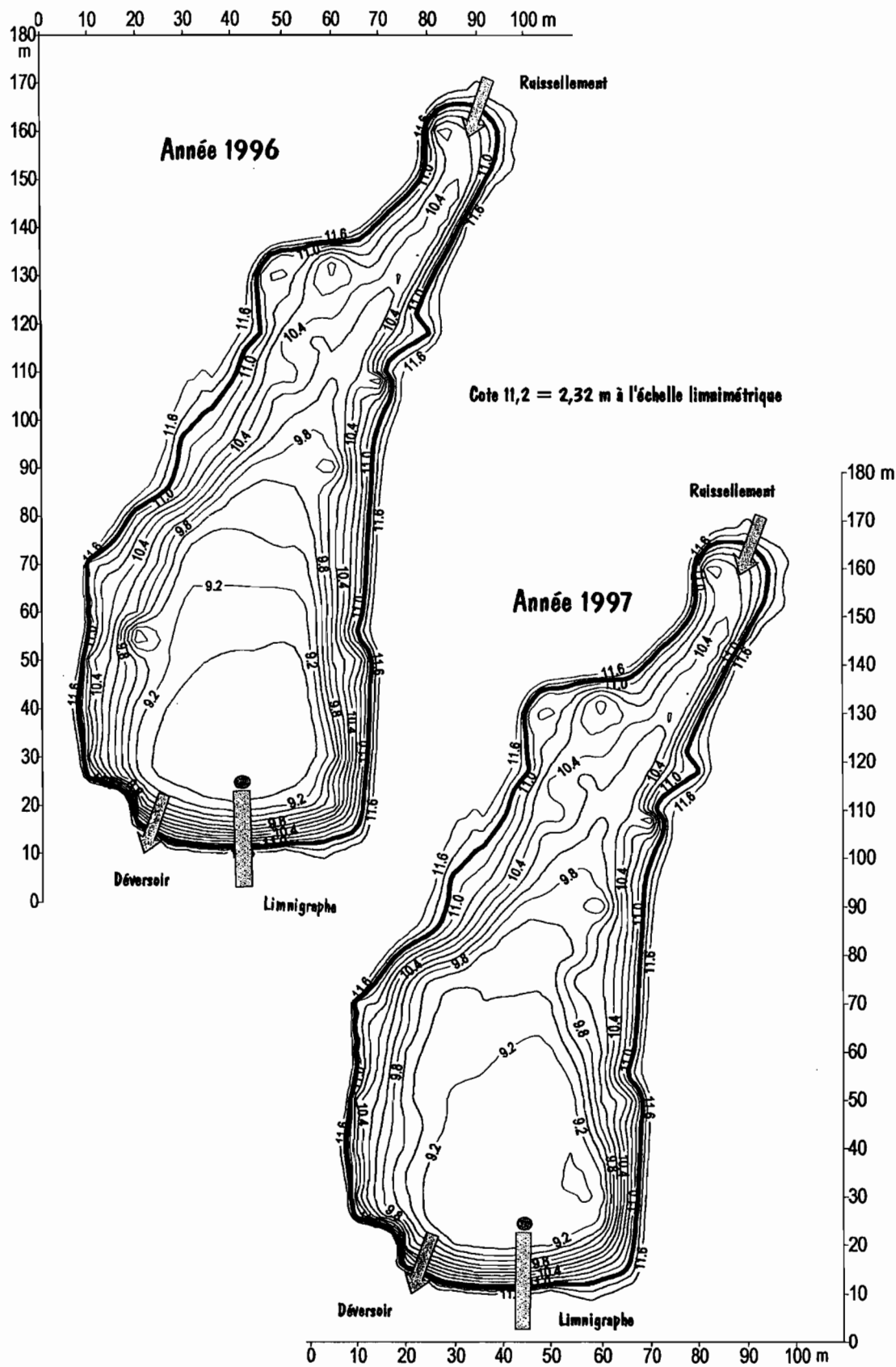
Annexe VII.2.4. Topographies de la retenue de El Tullido pour les années 1996 et 1997.



Cote 9,9 = 2,26 m à l'échelle limnimétrique



Annexe VII.2.5 Topographies de la retenue de El Viejo pour les années 1996 et 1997.



Annexe VII.3.1. Hyétogrammes centrés du pluviographe Carboneras.

CARBONERAS 1997

DATE DEBUT D'AUVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	Intensité maximum.																	
			10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10/03/97 12:09	9,6	8,1								34,6	1,3	14,5	6,2	1						
10/03/97 16:52	3,9	3,3	5,5	2,2	1	0,5	0,5	0,5	6,4	5,3	0,9									
21/03/97 13:56	7,8	6,2	2	1,9	2,2	3,3	4,4	9	14,4	3,4	1,7	0,3								
30/03/97 11:04	1,8	1,7						0,7	2,2	1,7	1,7	1,8	1,8	1,1						
07/04/97 10:40	4,5	4,1		1,2	2,9	0,9	1,2	2,3	5,8	5	4,4	3,3								
26/04/97 22:54	6,3	10,4	1	1	0,9	0,9	0,8	0,6	5,9	2,8	1,4	1								
27/04/97 07:45	3,0	2,1				1	1,1	1,5	2,5	2,4	2,1	2	2	2,1	1,3					
09/05/97 22:22	24,6	21,0					1,4	3,4	18,6	11,7	4,2	3,6	2,6	2,8	8,2	7,8	9,6	14,4	11,7	9,4
10/05/97 23:07	1,5	1,3						0,9	5,4	1,9	0,8									
22/05/97 15:55	4,2	2,5							10,2	4,7	3,7	3,8	1,4	1,3	0,1					
11/06/97 22:29	1,8	2,4					1	2,6	5,4	1,8										
13/06/97 17:02	8,7	5,3						2,9	45,7	1,5	2,1									
17/06/97 16:02	2,4	2,4	0,3	1,4	1,4	4	0,9	0,9	4,1	1,3										
21/06/97 04:00	3,6	1,1							4,2	2,8	3,1	3,8	3	3,7	1,2					
26/06/97 20:01	4,2	3,6						5,4	14,4	5,4										
26/06/97 22:58	1,2	1,0							3,3	2,7	1,2									
10/07/97 17:15	1,2	1,9				0,5	1,6	1,6	2,6	1										
11/07/97 19:13	11,1	9,7							38	14,2	13,1	1,1	0,2							
18/07/97 13:56	4,5	4,4							23,4	3,8										
18/07/97 16:03	3,0	2,9							7,8	4,1	3,8	1,8	0,7							
19/07/97 02:33	1,2	1,1					0,3	3	3,9											
19/07/97 13:10	33,3	30,2				2,9	13,3	54	70,2	54	5,4									
19/07/97 16:16	10,5	9,5						3,6	34,2	16,2	1,9	0,6	0,6	0,7	1,3	1,4	1,3	1,1	0,2	
21/07/97 01:30	18,6	18,3	1,1	2	3,9	2,5	5,6	5,4	40,5	19,8	16,7	3,8	6,6							
22/07/97 13:46	2,4	1,5							13,2	1,2										
29/07/97 19:31	1,5	1,5							8,3	0,7										
29/07/97 21:05	1,8	1,8							5,9	0,9	4									
29/07/97 22:52	1,8	4,9							9,1	1,4	0,3									
30/07/97 21:14	3,0	3,1							10,1	1,8	2,6	1,9	1,5							
08/08/97 18:07	2,7	3,7						2,9	13,3											
14/08/97 18:50	3,0	1,7							9,9	4,9	3,2									
15/08/97 21:03	1,5	1,6							7,7	1,3										
27/08/97 22:02	1,2	1,5							4,3	2,1	0,6									
28/08/97 19:05	18,6	15,9						3,6	86,6	4,7	4,4	2,1	5,3	2,9	1,4	0,8	0,5	0,5	0,8	5,6
29/08/97 19:04	1,8	2,3	0,4	0,4	0,4	0,4	2,1	2,3	2,8											
30/08/97 15:00	1,8	1,8							10,8											
04/09/97 18:07	3,6	3,7							20,2	1,4										
06/09/97 15:43	1,8	8,6							9	1,8										
07/09/97 01:39	4,2	3,0						2,9	20,5	1,8										
07/09/97 14:09	8,4	5,9							7,2	0,3	0,3	0,3	0,3	1,6	3,3	1,9	2,7	2,7	2,2	0,9
06/09/97 14:39	4,2	4,0							24	1,2										
11/09/97 20:43	4,8	3,7				1,1	1,6	2,6	19,3	4,1										
21/09/97 20:44	4,8	3,7					2,2	10,4	14,4	1,1	0,7									
22/09/97 18:34	1,2	1,4							3,6	2,3	1,3									
23/09/97 18:14	5,1	5,1				2	4,3	9,9	12,8	1,8										
24/09/97 19:59	3,9	7,2					4,3	3,5	8,4	5,4	1,8									
04/10/97 16:45	2,1	2,1						1,8	10,8											
04/10/97 18:55	2,7	2,7							9,6	2,1	1	0,5	0,5	0,5	2,1					
04/10/97 22:06	3,3	3,4							12,8	2,5	4,5									
06/10/97 14:49	11,4	10,4						9	54	5,4										
10/10/97 16:42	13,2	14,1		1,2	1,5	1,9	6,2	45	11,7	5	2,3	2,3	2	0,2						
10/10/97 21:05	3,0	3,2							5,7	2,3	1,2	0,4	0,4	0,4	0,7	2,3	3,3	1,2		
10/10/97 23:56	3,6	3,8			1	2,8	2,9	6,3	2,7	1,8	0,9	0,7	1,9	0,5						
11/10/97 15:00	6,6	6,7							37,8	1,8										
11/10/97 16:30	8,7	8,8						1,2	45,6	0,9	1,1	2,5	0,9							
11/10/97 19:23	4,8	4,9							26,1	2,3	0,5									
07/11/97 17:08	1,5	2,1			0,4	1,2	1	1	1,8	0,9	1	1,3	0,4							
11/11/97 06:57	2,1	1,6				0,8	1,4	1,4	2,9	1,6	1,3	1,3	1,2	0,6						
11/11/97 15:05	3,6	2,8					1,2	2,4	4,5	1,4	0,8	0,9	1,2	0,5	0,4	0,4	0,4	0,9	1,2	1,3
14/12/97 11:32	3,9	3,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,1	1,1	1,5	0,9	0,9	1,1	1,1	1,1	1,2	1				
			65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195				

Annexe VII.3.2. Hyétoigrammes centrés du pluviographe El Molino.

EL MOLINO 1996

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		Intensité maximum.																		
31/05/96 18:53	1,3																			
13/06/96 20:21	2,2																			
14/06/96 23:55	8,1																			
25/06/96 15:07	1,8																			
25/06/96 20:37	2,7																			
26/06/96 23:34	10,8																			
27/06/96 19:25	1,5																			
29/06/96 18:49	4,2																			
30/06/96 18:08	4,3																			
30/06/96 21:01	2																			
06/07/96 20:58	9,5																			
10/07/96 17:56	12,8																			
11/07/96 19:20	3,1	1,6	1,6	1,7	2,1	2	1,9	2,1	2,8	1,2										
11/07/96 22:03	3,3																			
12/07/96 17:36	1,6																			
14/07/96 22:45	2,6																			
16/07/96 00:36	2																			
24/07/96 21:36	1,4																			
04/08/96 04:23	2,9																			
05/08/96 14:54	3,2																			
06/08/96 00:03	2,3																			
07/08/96 21:16	18,9																			
07/08/96 23:32	3,9																			
09/08/96 19:39	4,3																			
13/08/96 16:51	1,6																			
13/08/96 18:20	1																			
13/08/96 19:57	4																			
18/08/96 19:39	11,4																			
20/08/96 18:18	2,1																			
23/08/96 19:24	15,1																			
24/08/96 19:38	18,9	0	0	0,7	10,1	7,8	7,1	9,1	20,4	4,6	2,5	0,1								
26/06/96 22:33	7,4																			
30/08/96 20:29	15,7																			
31/08/96 12:35	8,8																			
31/08/96 17:58	1,4																			
31/08/96 19:54	25,7	4	4,2	4,1	4,1	4,6	4,7	5,1	15,7	7,9	7,5	7,7	10,7	10,3	9	7,2	6,5	5,9	4,7	5,1
02/09/96 15:07	26,5																			
02/09/96 20:22	1,6																			
04/09/96 01:01	7,6																			
09/09/96 03:02	3,8																			
12/09/96 18:26	9,8																			
13/09/96 15:48	7,6																			
13/09/96 21:05	6,3	0	0	3	3,9	3,8	5,5	6,2	8,6	0,5	2,5									
18/09/96 17:53	3,7																			
02/10/96 18:00	1,9																			
03/10/96 00:59	2,6																			
03/10/96 05:53	4,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,5	2,4	2,6	3	1,6	0,5	1,6	1,3	0,4						
04/10/96 15:04	3,9	1,1	1,1	0,9	0,5	0,3	0,3	0,3	4,2	1,2										
04/10/96 23:38	3,8	1,5	0,5	0,8	0,6	0,5	1	3,6	5,6	3,3	0,2									
05/10/96 05:50	3,2																			

Annexe VII.3.3. Hyétogrammes centrés du pluviographe El Muerto.

EL MUERTO 1996

DATE DEBUT D'AVEUSE	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Intervalle maximum																				
31/05/96 18:49	1,3																			
01/06/96 18:58	3																			
15/06/96 16:20	7																			
15/06/96 21:43	2,4																			
16/06/96 23:03	4,8	1,8	1,4	1,4	1,2	0,5	0,5	4,9	8,3	3,3	0,5									
25/06/96 18:50	1,9								8,3	1,3	1	0,8								
30/06/96 18:06	4				0,5	2	0,3	2	11,4	6,8	1									
08/07/96 19:39	2,6								13	2,2	0,4									
08/07/96 21:06	2,2								9,8	0,6	0	0,6	0	1,1	1,4					
08/07/96 13:54	3,4								11,8	4,2	1,1	1,5	0,2	0,5	1,1					
10/07/96 21:52	2					0,5	1,3	0,2	1,8	1	0,8	1	1	0,7	0,6	1	1,1	1		
11/07/96 19:11	6,2				1,3	3,2	2,5	3,9	11,1	5,7	3	1,8	1,5	1,4	1,4	0,4				
11/07/96 22:53	2,6						0,7	2,7	7,4	3,4	1,4									
14/07/96 21:15	2,6								13,1	2,5										
14/07/96 22:50	4,2						0,7	4,4	6,3	1,6	1,9	5,3	3,2	1,6	0,2					
06/08/96 15:43	4,3						3,8	6,3	9,7	4,5	1,5									
07/08/96 20:26	28,5						2	38,2	94,8	28,8	6,7	0,5								
07/08/96 22:42	6,4								12	1,6	0,6	6,8	6,9	3,1	2,3	2,1	0,5	0	0	0
09/08/96 20:26	2,4								13,4	1										
13/08/96 17:01	24,6	0,3	0,3	0,1	0	1,1	2,5	9,3	42	33,9	8,7	4,1	3,6	11,6	5,8	1,6				
14/08/96 20:03	12,8		4,8	13,2	10,5	3,3	11,5	5,4	26	1	0	0,1	0,5	0	0,6					
18/08/96 18:00	15							3	37,2	4,2	15,2	1,6	0	0	1,8	15,3	3,3	0,6	2,5	2,5
20/08/96 18:44	4,8						6	7,6	10,4	3,2	0,6	0,8								
23/08/96 19:10	15,4								38,2	19,3	12,4	5,4	6,3	3,2	3,9	2,6	1			
24/08/96 04:51	1							1,3	3,2	1,6										
24/08/96 19:46	16	0,3	0,3	0,1	3,6	7,8	2,6	5,8	30	3,9	1,5									
27/08/96 22:36	5								26,7	3,3										
28/08/96 22:49	2,3								9,8	3,1	1,1									
30/08/96 20:20	16,2								34,8	10,1	6,8	15,6	23,9	5	1					
31/08/96 17:43	1							0,4	4,4	1,2										
31/08/96 19:42	20,2	2,4	3,3	3,1	3,7	4,4	5	6	17,2	6,6	6	4,2	4,5	4,1	5,5	6,3	6	5,6	3,8	3,2
02/09/96 15:12	25,8						13,8	18,6	51,2	29,2	15,2	10,5	7,3	2,6	2,9	2,9	0,6			
04/09/96 01:08	5,9	0,3	1,2	1,9	1,9	1,9	2,9	4	5,4	3,9	2,1	1,7	1,1	0,8	0,5	0,8	1,9	2,1	0,9	0,1
07/09/96 18:53	3,4							0,9	10,5	0	0	0	0	2,3	6,8					
09/09/96 03:12	3							1,2	16,8											
12/09/96 18:33	3,8								13,4	1,5	1,4	1,5	1,4	2,3	1,4					
13/09/96 15:43	5,8							1,2	13,8	1,4	1,4	3,7	0,6	2,4	5,5	1,3	1	0	2,4	
13/09/96 21:01	6,4	2,1	0,7	0,3	1,2	2,2	1,7	2,7	11,4	5,5	1,4	2,7								
18/09/96 17:57	25,6						24	22,8	33,3	13,8	8,1	3,9	1,1	1	0,4	0,9	1,7	0,8	0,2	0,2
02/10/96 18:27	5,4								17,8	9,2	4,1	1,3								
03/10/96 01:02	2,5					0,4	1,3	1,6	2	1,6	1,3	1,2	0,9	0,9	1,6	1,6	0,6			
03/10/96 05:01	8,1	2,2	2,2	2,4	3,6	3,4	2,9	0,5	5,4	1	1,2	1,3	0,7							
04/10/96 17:42	2,9	1,5	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,6	3,9	3,4	1,9	1								
27/11/96 13:54	3,5								19,9	1,1										

Annexe VII.3.4. Hyétoigrammes centrés du pluviographe Oso Negro.

OSO NEGRO 1996

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum.																
11/06/96 13:58	3,5	3,0			6,4	0,9	0,9	0,9	12										
14/06/96 13:52	2,0	3,1							7,9	4,1									
15/06/96 18:41	7,8	9,7	2	3,7	1,3	1,3	2,3	4	9,8	5,6	0,8	0,8	0,8	2,1	2,5	2,1	2,1	1,1	0,8
16/06/96 22:47	3,2	3,1	1,6	1,6	1,5	1,6	2,1	3,9	5,5										
25/06/96 15:09	13,0	15,0						6	34,5	5	1,3	1,3	24	4,1	1,8	0,2			
25/06/96 21:20	2,0	2,3							9,9	2,1									
30/06/96 18:24	1,5	1,7						1,1	3,7	2,2	1,6	0,3							
06/07/96 19:21	2,0	1,9						3,5	8,5										
07/07/96 14:02	2,0	2,0						4	8										
08/07/96 14:08	1,0	1,5						0,9	4,3	0,9									
10/07/96 18:12	1,5	2,1						1,9	1,9	1,9	1,4	1,4	0,4						
11/07/96 18:02	5,5	6,6					9	6	12	4,3	1,7								
11/07/96 19:13	5,5	6,6						3	27	1,4	1,4	0,3							
11/07/96 21:52	4,0	4,8					0,9	4,6	6,5	3,9	4,6	3	0,5						
12/07/96 17:31	1,0	0,9						0,5	4,6	0,9									
15/07/96 21:28	3,0	0,4							15,4	1,4	1,1								
16/07/96 01:39	2,0	0,5							11,2	0,8									
18/07/96 19:40	2,5	3,1							12,7	1,8	0,5								
01/08/96 21:09	5,5	5,3		0,4	3,8	8,1	1,4	1,4	15	1,5	1,5								
04/08/96 03:37	7,9	1,9	1,5	1,5	4,5	3,2	6,9	5,5	10,5	3,9	1,5	4	2,6						
04/08/96 19:11	1,5	0,4							6,5	2,3	0,2								
06/08/96 00:35	3,0	1,0							4,7	7,3	4,7	1,3							
06/08/96 03:49	1,0	0,3					0,9	1,4	1,4	1,4	0,9								
08/08/96 14:50	1,5	0,5						1,3	3,3	2,2	1,4	0,7							
07/08/96 20:15	5,5	5,9						6	24	3									
07/08/96 22:29	10,5	11,3							22,5	3,4	20,6	6,8	8,3	1,5					
09/08/96 22:33	1,0	0,9						1,3	3,2	1,6									
13/08/96 20:34	1,0	3,3							3	2,3	0,7								
14/08/96 20:30	4,0	3,7						3,4	14,8	3,5	1,5	1,1							
20/08/96 18:04	1,0	1,9					0,5	1,6	1,6	1,6	0,6								
23/08/96 19:21	7,5	8,6							14	7	9	4,5	3,4	1,8	1,3	1,2	1	1	0,8
24/08/96 19:31	7,0	15,6							18	9,3	2,5	3,8	4	2	1	1	0,4	0	0
28/08/96 22:18	4,5	5,2							21,5	2,5	3								
30/08/96 20:22	8,0	8,9						5	28	5,8	6,4	3,8	1,1						
31/08/96 12:13	1,5	1,8							6,4	1	1	0,6							
31/08/96 19:05	18,4	22,1	4	4,4	5,5	7,2	6	8,8	13	9,3	9,8	9	8,3	6,7	5,5	4,3	3,3	1,9	
01/09/96 13:48	7,0	7,4						3	21	17	1								
02/09/96 19:12	1,5	1,5							7,2	1,8									
03/09/96 23:29	10,0	11,1	1,2	1,2	1,2	1,8	3,5	4,5	6	4,5	5	4,2	2,8	2,3	1,9	4,4	4,6	3,9	4,1
07/09/96 18:51	2,0	2,6							6	0	0	0	0	0,2	1,9	1,9	1,9		
09/09/96 01:36	1,5	1,0						0,9	4,3	2,2	1,7								
12/09/96 16:15	5,0	5,4						3,3	4,2	13,5	2,3	6,7							
12/09/96 18:21	9,0	9,8							2	37	4,1	1,8	1,2	1,2	1,1	1	1,1	1,5	1,1
13/09/96 15:29	8,0	8,9			6	18	3	18,4	2,6										
13/09/96 21:39	2,5	2,8				0,9	2,1	3	4,1	3,8	1,1								
19/09/96 18:57	1,0	3,7				0,4	1	1	1	1	1	0,4							
03/10/96 02:54	1,0	4,6							3	1,8	1,2								
03/10/96 04:42	4,2	19,1	1,9	2	1,9	1,4	1,6	2,7	7,1	4,4	0,5								
03/10/96 12:05	7,0	31,9	4,5	2,8	3,2	2,8	3,3	2,3	9	2,1	2,9	2,8	2,3	1,9					
04/10/96 14:24	4,0	9,8	1,1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	3	2,1	1,9	1,8	1,1	1	1,1	1,1	0,8		
04/10/96 20:49	1,5	3,7					0,2	1,9	1,9	1,9	1,2	1,2	0,8						
04/10/96 22:58	4,3	10,4	0,7	0,7	0,7	0,7	2,3	3,8	8	5,7	1,3								
05/10/96 07:03	1,0	5,1						0,6	1,6	1,5	1,4	1							

Annexe VII.3.4. Suite.

OSO NEGRO 1997

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
			Intensité maximum.																					
07/03/97 17:45	2,0	2,0										9	1	1	1									
10/03/97 16:12	11,5	13,0									6	39	24											
10/03/97 20:24	3,5	3,9										4	2,6	1,5	1,9	2,4	2,1	0,4						
21/03/97 19:14	5,0	5,0										7	13	4										
07/04/97 14:09	5,5	5,4										6	9,7	4,9	4	1,5	2,1	2,5	1,7	0,7				
07/04/97 17:42	1,0	1,0										0,4	1,8	1,8	1,8	0,4								
26/04/97 21:12	1,0	1,0										0,6	1,6	1,8	1,6	0,6								
09/05/97 22:24	33,5	33,5										2	4	30,7	23,3	16	14	14,2	10,4	6	4,4	5	5,6	5,9
19/05/97 19:58	2,5	2,5												9										
22/05/97 16:05	5,0	5,0												9										
11/06/97 15:42	10,5	11,2																						
11/06/97 21:28	1,0	1,1																						
19/06/97 13:07	9,0	9,0																						
20/06/97 22:17	2,5	2,5																						
21/06/97 03:36	1,5	1,5																						
22/06/97 17:45	2,5	2,5																						
26/06/97 13:25	5,0	4,2																						
26/06/97 19:52	2,0	1,7																						
28/06/97 00:00	-	86,0																						
09/07/97 19:35	5,5	5,5																						
10/07/97 15:01	7,0	7,0																						
11/07/97 22:21	6,0	6,0																						
19/07/97 00:00	-	24,9																						
20/07/97 00:00	-	5,0																						
21/07/97 00:00	-	20,4																						
09/08/97 00:00	-	7,1																						
16/08/97 00:00	-	1,7																						
27/08/97 00:00	-	2,7																						
28/08/97 00:00	-	5,6																						
07/09/97 00:00	-	41,1																						
08/09/97 11:37	5,0	5,0																						
21/09/97 21:21	1,0	1,0																						
22/09/97 16:17	7,0	8,3																						
22/09/97 18:45	1,5	1,8																						
23/09/97 13:58	1,0	1,0																						
24/09/97 00:15	11,0	11,0																						
04/10/97 21:47	2,0	2,0																						
10/10/97 17:19	7,0	6,9																						
10/10/97 20:58	9,5	9,4																						
11/10/97 15:38	21,5	21,5																						
07/11/97 16:32	3,0	3,0																						
11/11/97 05:42	1,5	1,2																						
11/11/97 13:24	5,5	4,6																						

Annexe VII.3.5. Hyétogrammes centrés du pluviographe Pastelero.

PASTELERO 1996																			
DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum.																
01/06/96 18:59	2,5	5,2								9,8	3	1,8	0,6						
12/06/96 16:30	1,6	1,5							1,2	7,2	1,2								
13/06/96 20:28	4,6	3,4								24,9	2,7								
25/06/96 01:50	2,8	1,7								16,5	0,3								
25/06/96 14:07	4,6	2,8						2	4,5	11,1	6,6	2,9	0,5						
30/06/96 18:02	4,1	4,6				1,2	0	1,2	13,8	7,7	0,9								
30/06/96 21:02	1,5	1,7				0,3	2,9	0,4	0	4,2	1,2								
09/07/96 16:34	1,7	2,3								7	3,2								
10/07/96 17:53	3,7	4,6								19,2	3								
10/07/96 22:05	2	2,5							1,2	3,3	1,8	0,8	0,8	0,8	1,3	1,1			
11/07/96 19:14	20,7	18,6						0,4	6,7	47	40,7	5,7	8,6	5,1	2,2	2,4	2,4	2,2	0,9
11/07/96 22:14	2	1,8	0,6	0,7	0,4	1,1	1,4		3,1	2,3	2,3								
12/07/96 17:18	3,5	2,7								20,8	0,2								
14/07/96 20:33	4,3	4,7			1,3	8,8	0,1	0	11,8	1,3	1	1,7							
14/07/96 22:45	5,8	6,3			0,8	5,2	5,4	2,4	7,8	4,8	3,9	2,7	1,9						
02/08/96 21:57	1,8	1,6					3,6	0	6	1,2									
05/08/96 23:43	4,7	7,1			1,6	4,4	1	6,2	7,8	2,7	1,5	1,4	1,3	0,3					
07/08/96 20:08	19,4	24,5					19,4	36,4	50,4	7,8	2,4								
07/08/96 22:25	4,1	5,2			2,6	0,4	0	4,8	7,8	3,8	1,9	1,9	0,2	0	0	0	0	0,5	0,7
13/08/96 17:27	2,6	2,6						0,6	13,8	1,2									
13/08/96 20:02	18,9	18,8				3,7	1,4	0,9	85,2	4	1,6	2,1	7,3	3,5	1,7	1,4	0,7		
14/08/96 20:06	3,1	10,1							10,8	0	1,4	4,4	0,3	0,2	0,2	0,3	1,1		
18/08/96 15:17	2,3	1,8						1,8	10,3	1,7									
18/08/96 19:19	1,7	1,3						0,9	6,9	2	0,5								
20/08/96 18:23	14,1	14,0						5,2	45,2	17,6	14,5	1,9	0,2						
23/08/96 19:27	13,8	12,7							23,6	18,4	16,2	6	5,5	4,7	3,2	3,6	1,5	0,2	
24/08/96 04:47	1	1,0							4,5	1,5									
24/08/96 19:41	15,6	16,2	0,2	0,2	5,1	5,5	2	7,7	30,1	6	3,6								
28/08/96 22:37	6,9	7,7							37,8	3,6									
31/08/96 12:57	3,7	3,3					4,8	0	17,4										
31/08/96 17:31	4,1	3,6						1,1	11	5	2,5	1,3	3,1	0,7					
31/08/96 19:41	20,3	17,9	2,3	1,7	1,9	2,2	4,3	5,2	18,9	9	6,6	5,7	3,6	4,8	4	5,3	6,2	5,9	4,6
02/09/96 14:50	25,2	26,0					12,3	18,9	45,7	30,8	12,2	13,8	7,5	2,1	3,2	2,6	1	1	
04/09/96 01:19	5,7	1,4	1,1	1,4	2,8	3,4	3,4	3,6	5,7	2,1	1,3	1,1	1,1	1,1	2,2	2,5	1,3		
07/09/96 18:49	2,6	3,3							15	0,6									
08/09/96 17:02	1,1	1,6							6,2	0,4									
12/09/96 17:39	8,1	8,1		0,7	2,1	10,4	0,6	0	24	3,4	1,4	1,5	1,9	1,9	0,7				
13/09/96 15:16	10	10,3					1,4	7	33	4	0,6	0,2	1,2	1,2	3	3,4	1,9	1,2	0,7
13/09/96 20:46	7,2	7,4	0,5	0,3	0,5	4,5	4,8	3,3	11,1	6,2	3,9	1,3	1,2						
18/09/96 17:41	32,1	36,0			3,1	13,3	28,6	15	55,1	30,5	4,6	3,2	1,5	1,1	0,5	0,6	1,2	0,8	0
25/09/96 22:41	1,4	2,1						1,2	4,2	0,8	0,6	0,4	1	0,2					
03/10/96 06:12	4,1	40,7	1,2	1,2	1,3	1,8	2,2	2,3	2,8	2	1,2	1,7	1,4	0,3					
04/10/96 15:04	3,8	25,1	1,1	0,9	0,5	0,3	0,3	0,3	3,8	1,6									
27/11/96 13:55	3,5	10,8							18,9	1,1									

Annexe VII.3.5. Suite.

PASTELERO 1997

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum.																				
31/03/97 14:45	1,1	1,1				0,4	1,4	1,3	1,1	1,8	0,8												
01/04/97 14:29	2,3	2,3							4,6	9,2													
07/04/97 14:34	2,8	2,8	0,8	0,4	0,0	0,0	0,5	3,7	4,2	3,8	2,5	0,9											
14/04/97 18:35	6,6	6,6	1,5	1,9	1,1	0,8	0,8	1,5	3,8	1,6	2,0	1,6	1,5	2,0	2,5	0,7	0,5	0,6	0,7				
26/04/97 21:12	6,5	6,5	0,6	0,6	0,5	0,3	0,4	1,6	3,7	2,4	1,8	1,3	0,9	0,6									
09/05/97 21:57	14,1	14,1	2,2	4,7	5,5	5,8	6,2	4,8	10,2	4,4	0,8	0,8	0,8	2,6	1,7	1,9	2,0	1,2	1,3				
22/05/97 16:02	6,6	6,6						1,2	13,2	8,1	4,7	5,4	4,5	1,2	1,1	0,1							
11/06/97 22:27	2,7	2,7							9,7	3,9	2,0	0,6											
19/06/97 13:57	1,2	1,2							4,8	2,4													
21/06/97 03:59	3,6	3,6		2,6	1,8	1,9	2,1	3,0	3,8	2,8	2,0	1,3	0,5										
08/07/97 16:27	1,5	1,5							7,3	0,8	1,0												
09/07/97 19:29	1,1	1,1							6,0	0,6													
10/07/97 17:25	1,3	1,1						1,4	4,8	1,6	0,2												
10/07/97 20:10	2,2	1,8						2,1	11,1														
11/07/97 19:27	4,3	4,3							24,5	1,3													
18/07/97 16:27	1,2	1,2							1,9	1,6	0,8	0,2	1,5	1,4									
19/07/97 12:24	14,9	24,8						9,3	36,3	10	5,6	1,4	6,6										
19/07/97 15:48	5,2	8,6						10,2	12,0	4,4	1,6	0,4	0,3	0,3	0,5	1,1	0,4						
21/07/97 01:32	18,6	23,6	1,5	2,7	5,2	3,4	7,5	7,3	54,4	27	22	5,1	8,9										
22/07/97 13:20	2,4	2,4							55,0	5,0													
29/07/97 19:31	1,8	0,0							9,7	0,8													
30/07/97 21:14	2,0	0,0							6,7	1,2	1,7	1,3	1,0										
09/08/97 02:50	1,6	1,7							5,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	1,0							
09/08/97 17:00	5,2	5,5							28,6	0,0	2,4												
13/08/97 18:49	2,4	2,4							13,3	1,1													
16/08/97 13:56	1,6	0,5						1,8	7,2	0,6													
16/08/97 17:15	1,2	0,4						1,0	1,6	1,4	1,1	1,1	0,9										
28/08/97 19:23	3,2	3,2			0,1	0,5	0,0	1,8	12,7	4,1													
29/08/97 18:22	2,7	1,7							9,7	6,0	0,5												
29/08/97 19:56	2,1	1,3	1,2	1,1	1,3	2,2	2,5	3,7	0,7														
04/09/97 17:38	9,0	9,0						10	43,9														
07/09/97 01:18	3,2	3,7					0,2	1,1	9,2	0,9	0,3	0,1	0,1	0,1	1,2	1,3	1,3	3,1	0,4				
07/09/97 06:59	1,0	1,2						0,7	2,5	1,3	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,1					
07/09/97 14:54	2,2	2,6						4,4	4,4	4,4													
11/09/97 20:37	6,0	6,0					7,5	4,5	20,4	2,6	1,0												
21/09/97 20:27	4,9	4,9					6,7	9,5	11,4	0,5	0,5	0,7	0,1										
23/09/97 17:50	3,1	5,6					3,6	0,0	15,0														
23/09/97 19:41	2,7	5,2						6,2	10,0														
23/09/97 23:59	2,8	5,0							15,0	0,0	1,8												
06/10/97 14:39	5,6	5,6						1,4	13,8	11	7,2												

Annexe VII.3.6. Hyétogrammes centrés du pluviographe El Tullido.

EL TULLIDO 1996

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum.																
31/05/96 18:28	3,1	3,0								18	0,6								
15/06/96 16:19	1,9	1,3							0,5	4,3	1,7	3,7	0	0	0	1,2			
16/06/96 23:32	2,4	1,9	0,9	0,3	1,7	1,9	1	0,3	5	2,8									
29/06/96 17:43	4,2	5,5	0,2	0,4	0,4	3,7	1	3,3	11,4	4,8									
29/06/96 21:00	2,4	3,2			0,9	3,6	0,3	0	7	1,1	1,1	0,5							
06/07/96 15:14	1,7	1,6							9,8	0,4									
06/07/96 19:43	8,4	7,7	0	0	0	0,5	1	0,8	18,6	1,8	1,5	4,8	3,3						
08/07/96 14:11	4,1	3,4						3,1	20,8	0,6									
11/07/96 22:35	3,2	4,7		0,3	2,5	2,5	2,5	3,5	4,5	2,7	0,7								
12/07/96 15:57	1,9	1,7						1,6	9,2	0,6									
14/07/96 17:13	3,3	5,3						4,8	12,6	2,4									
15/07/96 00:58	2,5	1,5						1,8	4,8	4	2,1	1,8	0,7						
25/07/96 00:03	1,7	1,0							6	0,6	1	1,1	1,4	0,1					
05/08/96 23:44	1,6	3,1							4,9	1,1	0	0,9	2,1	0,6					
06/08/96 14:58	15,6	17,3						1,2	31	18,6	8,7	18,2	13,7	2,2					
07/08/96 20:34	10,4	7,2							43,6	12,6	3,1	2,7	0,4						
08/08/96 19:28	4,4	2,2							25,8	0,6									
09/08/96 20:32	1,9	2,4							9,3	2,1									
13/08/96 00:00	-	37,9																	
14/08/96 00:00	-	16,9																	
18/08/96 16:29	1,5	1,1							7,2	1,8									
18/08/96 18:20	15,7	11,1	5,4	0	0	26,9	13,3	39,6	6	3									
20/08/96 18:44	2,8	2,2						5,4	7,2	1,5	1	1,2	0,5						
23/08/96 19:47	13,5	16,5					5	17,8	33	6,6	10,6	2,2	4,2	1,6					
24/08/96 19:40	4,6	4,7							4,4	3,6	1,4	2,3	3,5	4,3	3,8	2,2	0,2	0	0,1
24/08/96 22:45	7,7	7,9			2,7	3,8	5,7		21,5	8,1	3,3	1,2							
27/08/96 22:42	2,1	2,2							9,1	2,7	0,8								
28/08/96 22:56	1,5	1,6							6	2,1	0,9								
29/08/96 01:54	1,3	1,4							3,6	3,1	1,1								
30/08/96 20:21	15,8	14,4						4,2	33,6	7	12,8	18,6	15,8	2,8					
31/08/96 11:57	18,6	17,7					2,4	24,6	58,4	27,3	0,9								
31/08/96 17:44	1,3	1,2							6,8	1									
31/08/96 19:41	12	11,4	2,9	3,2	3,5	5	6,3	11,1	18,9	12,4	4,1								
02/09/96 15:09	34	28,6					11,3	46,9	99	22,3	12,2	8,7	3,6						
02/09/96 20:16	2,7	2,3							13,7	2,5									
04/09/96 00:50	6,7	14,2	0,9	1,9	3,3	3,1	3,2	4,3	8,5	6,4	4,5	2,6	1,9	1,4					
07/09/96 19:04	1,3	2,7							6,6	0,4	0	0,3	0,3						
09/09/96 03:29	4,8	3,7						3,6	24	0	0,8	0,5							
12/09/96 16:47	3	3,8					0,4	5	12,6										
12/09/96 18:34	5,2	6,6							16,4	1,9	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	0,5	0,7
13/09/96 15:32	8	8,0			1,8	2,5	4,1	8,1	13,5	3,7	4,4	4,5	3,9	1,5					
13/09/96 21:05	5,8	5,8	0	0,5	2,5	0,9	0,9	3	12,7	7,8	3,3	0,9							
18/09/96 17:42	30,9	25,3					9,2	31,6	33,9	33,1	20,2	1,7	0,5	1,4	1,3	3,3	0,8	1,1	1,3
02/10/96 18:19	2,5	7,8							7,3	4,7	0,9	1	1,1						
03/10/96 00:00	-	50,1																	
04/10/96 00:00	-	23,6																	
05/10/96 03:02	3,2	5,3	1,4	1	0,3	0,3	0,6	0,7	2,4	1,3	1								
27/11/96 15:36	1,5	2,8							3,7	1,1	1,8	1,9	0,4						
28/11/96 00:17	1,6	3,6					0,6	1,4	1,6	0,9	0,6	1,5	1,4	1,1	0,2				
28/11/96 03:08	5,2	11,8	1,1	2,5	1	1,6	3,3	2,1	4,5	3,4	3,6	3,2	1,9	0,4					

Annexe VII.3.6. Suite.

EL TULLIDO 1997

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum																	
10/03/97 16:47	23,5	24,8								3,0	90,0	38	3,6	2,2	1,7	1,1	1,1	0,4		
10/03/97 21:22	3,5	3,7								5,1	2,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,4	4,0	2,1		
21/03/97 18:39	7,0	6,1			3,5	0,9	0,9	2,9	6,8	11,0	9,0	6,6	0,4							
30/03/97 14:56	1,5	1,6								4,4	1,6	1,4	1,4	0,1						
07/04/97 14:04	5,0	4,7								11,5	3,5	1,4	1,4	4,9	4,3	1,4	1,4	0,1		
14/04/97 00:00	-	9,5																		
26/04/97 00:00	-	14,2																		
09/05/97 00:00	-	3,4																		
22/05/97 00:00	-	4,3																		
12/06/97 00:00	-	6,3																		
26/06/97 00:00	-	9,0																		
28/06/97 00:00	-	18,6																		
08/07/97 00:00	-	2,2																		
10/07/97 00:00	-	5,4																		
11/07/97 00:00	-	13,3																		
18/07/97 00:00	-	8,1																		
19/07/97 13:29	4,0	4,3						6,0	3,0	8,2	4,4	2,3								
19/07/97 16:27	4,0	4,3						5,7	8,7	2,9	1,0	1,0	1,1	1,6	1,5	1,4	1,2			
20/07/97 13:07	14,0	14,6			9,6	12	4,0	5,8	4,7	22,5	9,0	12	4,5							
21/07/97 02:20	11,5	-			3,0	9,0	11	10	15,0	4,6	3,9	6,5	2,5	3,5						
22/07/97 13:54	1,5	1,8							7,1	1,9										
22/07/97 17:23	3,0	3,5							10,1	3,0	2,4	1,0	1,0	0,4						
29/07/97 18:56	2,5	4,5			3,4	0,7	0,7	0,7	9,4											
30/07/97 01:35	1,0	0,9							4,8	1,2										
30/07/97 21:13	8,5	7,8							18,2	2,1	13	8,5	1,8	1,2						
07/08/97 03:15	1,5	0,9							7,5	1,5										
07/08/97 16:40	8,0	3,8					3,7	1,2	1,2	28,8	1,2									
10/08/97 02:16	1,0	1,4					0,3	1,5	1,6	2,1	0,4									
14/08/97 17:51	8,5	7,1			0,5	0,5	0,5	1,2	5,3	28,0	2,8	1,0	1,0	6,3						
06/09/97 15:08	9,5	16,1					3,9	5,1	6,0	21,0	5,6	7,6	7,8							
07/09/97 01:41	8,5	6,0								21,9	3,5	4,0	1,1	0,5	0,5	0,5	0,5	1,1	13	3,9
07/09/97 14:22	7,5	5,3								16,5	2,3	1,3	1,2	6,9	2,0	1,7	1,4	2,1	3,6	3,2
07/09/97 17:38	3,5	2,5								2,7	2,0	2,0	2,3	1,7	1,8	1,4	1,4	1,7	1,7	1,9
08/09/97 15:12	5,5	6,2								31,5	1,5									
11/09/97 00:00	-	4,6																		
21/09/97 00:00	-	3,9																		
23/09/97 00:00	-	14,4																		
04/10/97 18:46	1,5	1,3								6,4	0,6									
04/10/97 22:02	4,0	0,7								22,0	2,0									
10/10/97 03:54	1,5	2,9								4,8	2,4	1,8								
10/10/97 07:03	1,5	2,9																		
10/10/97 22:12	6,0	11,6					1,3	1,9	2,5	3,2										
11/10/97 00:00	1,5	5,9						3,0	6,0	24,0	3,0									
11/10/97 06:00	1,0	3,9								6,3	1,4	1,4								
07/11/97 15:08	1,0	1,8								4,0	1,2	0,8								
07/11/97 17:30	1,5	2,7								3,9	1,0	1,0	0,1							
11/11/97 05:48	2,0	2,6			0,7	1,1	1,1	1,2	1,2	1,4	1,7	0,7								
11/11/97 13:28	4,0	5,0						0,1	1,4	1,4	2,7	2,2	2,1	1,9						
										5,2	2,7	3,3	3,1	2,8	2,0	1,7	1,4	1,4	0,4	

Annexe VII.3.7. Hyétogrammes centrés du pluviographe El Viejo.

EL VIEJO 1996

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluviog.	Pluie moyenne BV	Intensité maximum.																	
			10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
31/05/96 19:04	5,5	6,3								21,7	8,8	2,5								
12/06/96 15:56	6	4,9								27,4	3,8	4,9								
12/06/96 22:04	1	0,8							0,5	5	0,5									
15/06/96 15:39	9	10,2						6,4	5,6	21	6	8,4	3,1	3,5						
15/06/96 21:16	2,5	2,8							3,2	5,8	2	2,1	1,9							
16/06/96 22:58	11,5	12,3								7	5,7	5,9	3,4	4,2	5,7	5,3	5,1	6	5,9	4,2
25/06/96 13:42	3	5,8						4	4,5	6,5	1,2	1,2	0,6							
25/06/96 18:33	3,5	6,8							1,6	7,4	2	1,6	1,3	1,2	0,9	0,9	0,9	1,7	1,6	
26/06/96 03:48	2	0,6							1,6	2,6	2,4	1,9	2,3	1,2						
26/06/96 20:27	1,5	0,5	0,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	0,8										
30/06/96 18:01	2	2,1					1,5	2,5	2,8	5,2										
30/06/96 20:19	5	5,3	2,5	2,4	3,1	3,2	2,2	1,9	10,5	1,5										
05/07/96 19:50	2,5	1,7							11,1	3,9										
10/07/96 21:32	4,5	6,0					2,7	3	3,3	6	3,3	0,8	0,8	0,8	1,2	1,5	1,3	1,2	1,1	
11/07/96 00:56	1	1,0					0,3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,3							
11/07/96 18:39	47,5	46,2					1,4	1,4	33,1	108	81	30	16,5	3,9	2,1	2,5	3,4	1,6		
11/07/96 22:41	2	1,9			0,9	1,7	1,7	1,7	3	2,1	0,9									
14/07/96 20:15	13	13,1					7	6,5	22,5	2,7	5,3	4	1,8	1,2	0	0	0	0	0,6	
23/07/96 20:08	1	1,0					1,2	1,2	1,2	1,2	1,2									
01/08/96 21:47	7	5,6							30	2,3	4,1	0,9	0,9	2,3	1,5					
05/08/96 00:29	1	1,1							1,1	3,7	1,1									
06/08/96 00:01	1	1,1							1,4	2,9	1,7									
07/08/96 20:19	23	25,0					1,5	25,5	90	13,7	7,3									
07/08/96 22:12	8	8,7	3,2	3,8	11	1,6	2,9	13,5	8	2,6	1,4									
13/08/96 18:40	27,5	28,4							89	12	6,5	8,5	4,6	16,4	8,1	3,3	1,9	1,6	12,2	
14/08/96 19:37	22,5	23,6					9	27	63	28,5	7,5									
20/08/96 18:25	31	30,9						9	60	36	24	42	12,8	2,3						
23/08/96 19:03	18,5	15,4			1,1	3,8	2,4	2,7	27	8	14	25	14,5	4,3	3,2	2,9	1,4	0,7		
24/08/96 19:29	17	18,3							16	15,5	6,2	2,8	2,8	3,4	3,5	3	4,5	2,3	2,3	
28/08/96 17:47	1	1,4							6											
28/08/96 22:19	6	8,5						4,5	19,5	12										
29/08/96 17:46	2	4,0						2,4	7,8	1,8										
30/08/96 20:03	8	6,7				2,4	3,9	2,7	15	7,3	4,9	2	1,3	0,9	0,9	1	1,3	1,3	2,6	
31/08/96 16:27	9	7,7	0,7	1,4	1,4	1,4	3,1	23	3,1	1,4	2,3	2,5	2,7	7	2,8	1,2				
31/08/96 20:57	18,5	15,8						5,3	10,5	5,3	4,9	6,1	6,5	8	8,1	6,9	7	5,6	5	
02/09/96 14:32	17,5	21,0				2	19	22,5	46,5	3,3	3,7	5								
03/09/96 16:21	9	16,8							21,7	3,1	1,2	1,4	2	6,6	14,3	1,8	1,1	0,9		
04/09/96 01:30	5	2,1	1,5	1,7	1,9	3,8	2,8	4	4,5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,6					
07/09/96 14:03	4,5	4,4							11,2	10,7	5									
07/09/96 18:39	1,5	1,5						1,3	3,2	3,1	1,5									
12/09/96 17:41	9	8,3			8,3	10,4	1,2	1,2	20,1	3,5	2,8	2	1,8	2,5	0,2					
13/09/96 20:10	12,5	14,9	1,7	3,4	9,8	4,3	2,4	11,3	18	3										
18/09/96 17:40	15	14,3						5	26	7,6	4,2	8,3	6,6	3,7	2,5	2,5	0,6	0,6	0,6	
20/09/96 16:37	1	1,0					0,8	1,5	1,5	1,5	0,8									
25/09/96 21:50	14,5	15,8						15	36	30	6									
27/11/96 17:55	1,5	1,8							3,9	2,1	1,5	1,5								
28/11/96 00:44	3,5	4,2		0,2	2,4	2,4	2,1	1,9	3,7	2,3	3,1	1,2	1,2	0,8						
28/11/96 04:01	8,5	10,1	1,4	1,4	2,5	4,7	4,4	6,4	9	3,6	4,2	4,5	2,9	2,3	0,5					

Annexe VII.3.7. Suite.

EL VIEJO 1997

DATE DEBUT D'IVERSE	Pluie pluvlog.	Pluie moyenne BV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			Intensité maximum.																		
17/01/97 14:39	1,5	7,6										3,8	0,9	0,9	2,3	1,1					
18/01/97 01:31	3,0	3,1										6,1	1,2	1,2	3,6	5,0	1,0				
18/01/97 08:08	7,0	7,3										5,1	4,8	3,1	2,7	1,8	3,7	1,8	1,5	1,1	0,4
18/01/97 11:51	4,0	4,2	0,7	2,3	4,0	4,0	4,0					2,1	1,0	0,8	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2	1,3	1,9
19/01/97 01:51	1,0	0,9										4,0	1,1	0,9							
19/01/97 09:24	8,5	7,9					3,7	2,3				9,8	7,7	6,2	4,0	1,5	1,8	2,5	2,7	4,1	2,3
01/03/97 16:45	1,0	0,9										6,9									
13/03/97 03:06	7,0	5,4									4,2	37,7									
22/03/97 05:02	7,0	6,9	6,3	1,7	2,2	2,8	3,5					7,5	6,0	4,1	3,2	3,7	1,0				
30/03/97 21:58	2,0	1,8										6,0	1,7	1,6	1,2	1,2	0,4				
31/03/97 21:05	1,5	1,8										4,8	4,2								
07/04/97 17:49	3,0	3,6										7,7	4,3	2,7	3,3						
26/04/97 00:00	-	11,6																			
09/05/97 00:00	-	29,4																			
10/05/97 00:00	-	2,7																			
22/05/97 00:00	-	3,1																			
23/05/97 00:00	-	9,9																			
28/06/97 19:47	3,0	1,0										16,0	2,0								
28/06/97 23:05	1,0	0,3										6,0									
28/06/97 19:03	15,0	13,6								9,0		22,0	6,3	13,7	16,2	6,6	5,5	4,3	1,6	1,3	1,8
28/06/97 22:24	14,5	13,2										9,0	4,2	4,4	4,9	5,3	4,7	4,8	4,4	5,5	4,7
29/06/97 20:37	2,0	3,0	0,9	2,1	0,8	0,8	0,8	0,8				3,0	2,5	0,5							2,9
11/07/97 00:00	-	2,7																			
19/07/97 00:00	-	3,1																			
20/07/97 00:00	-	44,3																			
21/07/97 00:00	-	4,4																			
22/07/97 18:24	6,0	5,7										31,0	5,0								
09/08/97 15:07	1,5	3,2										7,2	1,8								
09/08/97 17:30	7,0	14,9										16,0									
13/08/97 18:15	10,5	10,2										21,0	1,8	4,2	10,5	12,0	10,5	3,0			
16/08/97 14:14	3,5	4,0										8,6									
16/08/97 16:34	2,5	2,8										3,3	1,4	1,4	1,1	1,1	0,7				
28/06/97 14:12	1,5	2,2										4,7	1,8	1,6	0,9						
28/08/97 20:08	5,0	7,5										21,0	4,6	2,5	1,9						
29/08/97 18:33	4,0	4,2										4,7	1,8	1,7	3,9	0,8	0,8	0,8	1,3	3,2	1,3
04/09/97 18:02	3,5	2,9										10,2	2,1	0,9							1,2
07/09/97 01:27	4,5	4,3							3,0	4,8		21,7	4,2	1,1							
07/09/97 06:47	2,0	1,9										9,0	3,0								
07/09/97 14:17	4,5	4,3	3,0	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0				5,8	2,5	3,2	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	1,5
11/09/97 20:44	4,0	4,0										7,5	2,6	1,9	6,9	1,5	1,5	1,6	0,5		1,4
21/09/97 20:24	5,0	5,1										16,0	4,2	1,7	3,2						
23/09/97 17:09	10,0	10,6	3,3	0,7	0,7	0,7	0,7	6,1				24,0	11,5	8,0	4,5						
23/09/97 23:10	7,5	7,9										27,0									
24/09/97 19:18	19,5	20,5										84,0	27,0	8,5	3,2	0,3					
04/10/97 22:35	1,0	1,3										5,1	0,9								
10/10/97 15:25	19,5	21,1	0,5	0,5	0,5	1,1	2,3	3,0				75,0	22,3	2,4	1,2	1,3	2,5	0,2			
10/10/97 23:52	2,0	2,2										4,2	1,9	1,1							
11/10/97 07:37	1,5	1,5										4,3	1,5	3,1							
11/10/97 17:10	10,0	10,1	1,9	1,7	0,8	0,8	0,8	3,3				16,0	4,0	3,2	3,8	9,3	2,7	2,0	1,8	1,6	0,6
11/10/97 22:38	1,0	1,0										5,1	0,9								
07/11/97 16:51	1,5	2,8										4,0	1,1	1,4	2,5						
07/11/97 18:38	2,0	3,8	1,0	1,2	1,7	1,5	1,3	1,4				2,0	0,6								
11/11/97 06:54	1,5	2,5										3,7	0,8	0,8	0,8	1,8	1,3				
11/11/97 13:31	4,0	6,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,3	1,9				3,8	3,1	2,6	0,8	0,8	0,8	1,1	1,6	0,8	

Annexe VII.4.1. Pluie moyenne du bassin versant Carboneras.

CARBONERAS 1996		Pluie journalière en mm			
No. pluviomètre	T27	T26	PG6	PM5	Pluie moyenne du bassin versant
Superficie du bassin en %	18,7	17,2	50	14,1	
16/2/96	1,0				0,2
15/5/96		7,0			1,2
24/5/96	9,0	2,0			2,0
31/5/96	1,0	1,0	0,8	1,6	1,0
1/6/96	11,0	11,0	8,6	3,8	8,8
11/6/96			0,2		0,1
12/6/96	1,0		3,0		1,7
13/6/96		2,0	5,4		3,0
14/6/96	6,0	5,0	1,3		2,6
15/6/96	31,5	28,0	27,5	9,6	25,8
16/6/96	8,3	7,4	7,3	5,5	7,3
25/6/96			5,2	3,2	3,1
26/6/96	1,5	3,0	0,8	0,7	1,3
29/6/96				0,6	0,1
30/6/96	7,0	8,5	3,8	6,5	5,6
1/7/96				0,1	0,0
8/7/96				6,5	0,9
7/7/96	1,5	2,0			0,6
8/7/96	3,4	3,9	4,3	3,4	3,9
9/7/96	3,1	3,6	3,9		3,1
10/7/96	3,8	3,5	4,4	2,2	3,8
11/7/96	8,2	7,5	9,6	9,6	9,0
14/7/96	13,5	14,0	14,9	7,9	13,5
15/7/96	0,0	2,5	1,9		1,4
18/7/96			0,1		0,1
1/8/96	1,5				0,3
2/8/96				0,4	0,1
3/8/96			0,3	0,6	0,2
5/8/96	3,2	3,3	3,2	3,4	3,2
6/8/96	3,4	3,5	3,3	4,4	3,5
6/8/96				8,0	1,1
7/8/96	30,9	33,5	24,1	25,0	27,1
8/8/96	1,0		0,1		0,2
12/8/96	3,0	3,0	0,2		1,2
13/8/96	22,0	24,0	22,9	26,0	23,4
14/8/96	13,5	11,0	11,8	13,1	12,2
15/8/96			0,6		0,3
18/8/96	2,0	2,0	3,9	15,3	4,8
20/8/96	11,5	9,0	4,7	4,8	6,7
22/8/96			0,1		0,1
23/8/96	2,0	10,5	17,8	17,7	13,6
24/8/96	19,0	19,0	16,0	16,0	17,1
27/8/96	7,0	6,6	4,6	5,0	5,4
28/8/96	11,5	10,9	7,5	4,1	8,4
30/8/96	10,0	10,5	16,4	16,8	14,2
31/8/96	18,0	19,5	23,1	23,4	21,6
1/9/96			0,6		0,3
2/9/96	26,5	25,0	26,1	26,0	26,0
3/9/96	21,0	25,0	5,6	6,2	11,9
4/9/96	4,0	5,5	0,1		1,7
7/9/96	4,0	8,0	3,0	3,4	4,1
8/9/96	2,0	6,5	2,4	3,6	3,2
12/9/96	7,0	4,0	3,9	5,0	4,7
13/9/96	19,0	13,0	12,0	12,2	13,5
18/9/96	32,0	28,0	21,9	25,6	25,4
19/9/96			0,8	0,9	0,5
25/9/96	3,0	1,0	0,7	0,6	1,2
2/10/96	13,0	15,0	11,0	15,2	12,7
3/10/96	47,4	51,0	50,9	52,1	50,4
4/10/96	32,7	35,0	35,1	31,0	34,1
5/10/96	5,9	8,0	6,3	4,7	5,9
6/10/96		3,0	2,8	1,8	2,2
26/11/96	1,6	1,7	1,3	1,4	1,4
27/11/96	11,4	12,3	9,6	9,7	10,4

Annexe VII.4.1 Suite.....

CARBONERAS 1997		Pluie journalière en mm			
No. pluviometre	127	126	PG6	PM5	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	18,7	17,2	50	14,1	du bassin versant
10/3/97	12,0	12,0	14,1	12,7	13,1
11/3/97			0,6		0,3
18/3/97	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6
21/3/97	6,4	6,4	7,8	6,9	7,2
30/3/97	1,8	1,8	2,2	1,9	2,0
31/3/97	1,2	1,2	1,4	1,3	1,3
7/4/97	4,2	4,2	5,1	4,5	4,7
14/4/97	7,0	2,0	7,0	5,3	5,9
26/4/97	12,0	17,0	10,4	13,1	12,2
27/4/97	2,0	2,0	2,8	2,3	2,4
5/5/97	1,0	1,0	1,8	1,3	1,4
7/5/97	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1
9/5/97	24,0	23,0	25,2	24,1	24,4
10/5/97	2,0	1,0	1,5	1,5	1,5
18/5/97			0,3		0,2
19/5/97			0,3		0,2
22/5/97	1,0	1,0	4,2	2,1	2,8
23/5/97	1,0	2,0	1,2	1,4	1,3
31/5/97	0,5		0,3		0,2
5/6/97	0,5		0,3		0,2
11/6/97		6,0	2,7	4,4	3,0
12/6/97			0,3		0,2
13/6/97			10,5		5,3
14/6/97			0,3		0,2
17/6/97			2,7		1,4
19/6/97	8,0	5,0	2,1	5,0	4,1
20/6/97	2,0	3,0	4,8	3,3	3,8
21/6/97	3,0	2,0	0,3	1,8	1,3
25/6/97	1,0	1,0	0,3	0,8	0,6
26/6/97	3,0	4,0	5,7	4,0	4,7
27/6/97			0,3		0,2
28/6/97	21,0	20,0	23,4	14,7	21,1
29/6/97			0,9		0,5
8/7/97	1,0	0,0	1,2	0,5	0,9
9/7/97	0,0	0,0	0,6	0,5	0,4
10/7/97	2,0	4,0	1,5	0,8	1,9
11/7/97	9,0	7,0	12,0	5,5	9,7
18/7/97	5,0	7,0	9,3	4,0	7,4
19/7/97	50,0	39,0	44,7	17,2	40,8
20/7/97	21,0	19,0	19,1	11,0	18,3
21/7/97	1,0	2,0	0,7	0,5	1,0
22/7/97	0,0	0,0	3,0		1,5
29/7/97	4,0	4,0	6,3	2,5	4,9
30/7/97	1,0	5,0	3,0	3,9	3,1
31/7/97			0,6		0,3
4/8/97			2,4		1,2
7/8/97	0,0	0,0	1,2	0,0	0,6
8/8/97	4,0	4,0	3,6	3,0	3,7
9/8/97	5,0	2,0	4,5	3,7	4,1
10/8/97				3,2	0,5
13/8/97	3,0	2,0	2,1		2,0
14/8/97	0,0	0,0	3,3	0,6	1,7
15/8/97			1,5	6,3	1,6
18/8/97	0,0	0,0	2,1	0,5	1,1
17/8/97			0,6		0,3
21/8/97	3,0	1,5	0,9		1,3
26/8/97				0,0	0,0
27/8/97	3,0	1,5	1,2	0,4	1,5
28/8/97	17,0	13,0	18,6	8,5	15,9
29/8/97	0,0	1,0	3,0	4,3	2,3
30/8/97			1,8		0,9
1/9/97	0,0	0,0		0,4	0,1
4/9/97	3,0	6,0	4,2		3,7
5/9/97				0,3	0,0
6/9/97	9,0	7,0	7,8	12,8	8,6
7/9/97	9,0	9,0	8,4	10,3	8,9
8/9/97	4,0	3,0	4,2	4,6	4,0
9/9/97					0,0

Annexe VII.4.1. Suite.

CARBONERAS 1997	Pluie journalière en mm				
No. pluviometre	T27	T26	PG6	PM5	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	18,7	17,2	50	14,1	du bassin versant
10/9/97				0,0	0,0
11/9/97	3,0	2,0	4,8	2,5	3,7
16/9/97	1,0	0,0			0,2
21/9/97	3,9	3,4	4,8		3,7
22/9/97	1,5	1,3	1,8		1,4
23/9/97	5,3	4,7	6,6		5,1
24/9/97	5,3	4,6	6,6	14,8	7,2
4/10/97	9,5	9,0	9,0	3,0	8,2
5/10/97			0,3		0,2
6/10/97	12,0	11,0	11,4	4,0	10,4
10/10/97	23,0	22,0	21,3	17,0	21,1
11/10/97	22,0	21,0	21,9	12,0	20,4
28/10/97			0,9	2,0	0,7
29/10/97	1,0	1,0	0,9		0,8
6/11/97	0,5	0,5	5,4		2,9
7/11/97	4,0	4,0		5,0	2,1
8/11/97					0,0
9/11/97					0,0
10/11/97	2,5	3,0	2,6	5,8	3,1
11/11/97	4,0	5,0	5,5		4,4
12/11/97			0,3		0,2
13/12/97	2,0	2,0	2,1		1,8
14/12/97	3,0	3,0	3,9		3,0

Annexe VII.4.2. Pluie moyenne du bassin versant Oso Negro.

OSO NEGRO 1996		Pluie journalière en mm	
No. pluviomètre	PG3	T6	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	74,3	25,7	du bassin versant
22/05/96	0,5		0,4
29/05/96	1,5		1,1
06/06/96		4,0	1,0
11/06/96	4,0		3,0
12/06/96	1,0		0,7
13/06/96	1,0		0,7
14/06/96	3,5	2,1	3,1
15/06/96	10,5	7,3	9,7
16/06/96	3,5	2,1	3,1
19/06/96	0,5		0,4
25/06/96	16,5	19,4	17,2
26/06/96	0,5	0,6	0,5
30/06/96	2,0	1,0	1,7
01/07/96		2,5	0,6
06/07/96	2,5		1,9
07/07/96	2,0	2,0	2,0
08/07/96	1,5	1,6	1,5
09/07/96	0,5	0,5	0,5
10/07/96	2,0	2,2	2,1
11/07/96	17,5	19,1	17,9
12/07/96	1,0	0,7	0,9
13/07/96	1,5	1,0	1,4
14/07/96	1,5	1,1	1,4
15/07/96	0,5	0,3	0,4
16/07/96	0,5	0,4	0,5
18/07/96	3,0	3,5	3,1
24/07/96	0,5	1,0	0,6
01/08/96	5,5	4,9	5,3
03/08/96	8,0	7,1	7,8
04/08/96	2,5	1,6	2,3
05/08/96	4,0	2,6	3,6
06/08/96	2,0	1,3	1,8
07/08/96	16,5	19,0	17,1
08/08/96	0,5	0,4	0,5
09/08/96	1,0	0,8	0,9
12/08/96	0,4	0,3	0,4
13/08/96	3,6	2,6	3,3
14/08/96	4,0	3,0	3,7
15/08/96	0,5		0,4
18/08/96	1,0		0,7
20/08/96	2,5		1,9
21/08/96		1,0	0,3
22/08/96	0,5		0,4
23/08/96	9,1	7,0	8,6
24/08/96	15,4	16,0	15,6
26/08/96	7,0		5,2
29/08/96	0,5	4,0	1,4
30/08/96	9,0	8,8	8,9
31/08/96	23,5	22,9	23,3
01/09/96	7,5	7,3	7,4
02/09/96	2,0		1,5
03/09/96	11,5	10,0	11,1
07/09/96	2,5	3,0	2,6
08/09/96	2,5	2,0	2,4
09/09/96	1,0	1,0	1,0
12/09/96	15,0	16,0	15,3
13/09/96	12,0	11,0	11,7
14/09/96	0,5		0,4
19/09/96	1,5	10,0	3,7
20/09/96	0,5		0,4
02/10/96	9,5	6,0	9,1
03/10/96	58,1	49,0	55,8
04/10/96	25,0	21,0	24,0
05/10/96	5,3	4,5	5,1
06/10/96	0,6	0,5	0,6
07/10/96	1,5	1,3	1,4
15/10/96	0,5		0,4
27/11/96	12,0	12,0	12,0

Annexe VII.4.2. Suite.

OSO NEGRO 1997		Pluie journalière en mm	
No. pluviomètre	PG3	T6	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	74,3	25,7	du bassin versant
18/01/97	5	2	4,2
19/01/97	22	11	19,2
20/01/97	16	8	13,9
01/02/97	21,5	22	21,6
03/02/97	0,5		0,4
07/03/97	2	3	2,3
10/03/97	15,5	21	16,9
11/03/97	0,5	1	0,6
18/03/97	0,5	0	0,4
19/03/97	5	4,5	4,9
30/03/97	1	1	1,0
31/03/97	0,5	0,5	0,5
07/04/97	6,5	6	6,4
14/04/97	8	10	8,5
26/04/97	18,5	16,1	17,9
27/04/97	0,2	0,2	0,2
28/04/97	0,3	0,2	0,3
09/05/97	33,5	29,2	32,4
10/05/97	1,5	1,3	1,4
19/05/97	2,5	4	2,9
22/05/97	5		3,7
23/05/97	1,5		1,1
11/06/97	12	13	12,3
12/06/97	2	3	2,3
13/06/97	1		0,7
19/06/97	9	10	9,3
20/06/97	4	4	4,0
22/06/97	2,5		1,9
23/06/97	1		0,7
26/06/97	8	0	5,9
28/06/97	83,5	86	84,1
08/07/97	2,4	3	2,6
09/07/97	5,6		4,2
10/07/97	8	11	8,8
11/07/97	7,5	5	6,9
18/07/97	1	0	0,7
19/07/97	25,5	23	24,9
20/07/97	5	5	5,0
21/07/97	20,5	20	20,4
22/07/97	2	0	1,5
29/07/97	0,5		0,4
30/07/97	1	9	3,1
31/07/97	0,5		0,4
06/08/97	1		0,7
07/08/97	1	1	1,0
08/08/97	1	1	1,0
09/08/97	7,5	6	7,1
13/08/97	0,5		0,4
14/08/97	0,5		0,4
15/08/97	0,5		0,4
16/08/97	2	1	1,7
27/08/97	1,5	6	2,7
28/08/97	6,5	3	5,6
07/09/97	41,5	40	41,1
08/09/97	5,5	10	6,7
21/09/97	1	1	1,0
22/09/97	10,5	9	10,1
23/09/97	14,5	13	14,1
25/09/97	0,5		0,4
04/10/97	3,5	2,5	3,2
06/10/97	0,5	0,5	0,5
07/10/97	1	0,5	0,9
10/10/97	17,6	12,5	16,3
11/10/97	23,9	17,5	22,3
28/10/97	2		1,5
29/10/97	0,5		0,4
31/10/97	0,5		0,4
07/11/97	6,0		4,5
10/11/97	1,7		1,3
11/11/97	7,8		5,8
16/11/97	0,5		0,4
30/12/97		3,0	0,8

Annexe VII.4.3. Pluie moyenne du bassin versant Pastelero.

PASTELERO 1996		Pluie journalière en mm			
No. pluviomètre	T27	T35	T30	PG8	Pluie moyenne du bassin versant
Superficie du bassin en %	33,5	25,0	6,5	33,0	
18/02/96	1,0				0,3
22/05/96		6,0		4,4	3,0
24/05/96	9,0				3,0
31/05/96	1,0				0,3
01/06/96	11,0	2,0	2,0	2,6	5,2
11/06/96			1,0		0,1
12/06/96	1,0	1,0	1,0	2,5	1,5
13/06/96		5,0	5,0	5,1	3,4
14/06/96	6,0			0,1	2,0
15/06/96	31,5	11,2	11,6	11,4	18,1
16/06/96	6,3	3,8	3,9	4,0	5,4
24/06/96		2,5	2,8	2,9	1,8
25/06/96		6,5	6,7	6,8	4,4
26/06/96	1,5	5,0		0,4	1,9
30/06/96	7,0	4,5	11,0	5,7	6,3
07/07/96	1,5				0,5
08/07/96	3,4	0,6	0,7	0,5	1,5
09/07/96	3,1	2,1	2,3	1,7	2,3
10/07/96	3,8	9,4	10,6	7,6	7,0
11/07/96	8,2	26,8	32,3	23,2	20,3
12/07/96		4,5	5,0	3,6	2,7
14/07/96	13,5	8,0	11,0	10,6	11,0
15/07/96	0,0	2,5	2,5	2,2	1,6
01/08/96	1,5				0,5
02/08/96		2,0	5,1	1,9	1,6
03/08/96		1,4	1,3	0,5	0,6
04/08/96		0,9	0,8	0,3	0,4
05/08/96	3,2	13,7	12,7	4,7	7,1
06/08/96	3,4				1,1
07/08/96	30,9	35,0	31,5	23,9	29,7
08/08/96	1,0	3,0	3,5	0,0	1,4
09/08/96		3,0	3,0	0,0	1,0
12/08/96	3,0	0,5	0,5	0,4	1,3
13/08/96	22,0	20,6	20,1	21,8	21,4
14/08/96	13,5	12,9	12,7	3,8	10,1
18/08/96	2,0	2,5	3,0	4,6	3,1
20/08/96	11,5	16,5	15,0	14,3	14,0
22/08/96		1,0	0,0	0,0	0,3
23/08/96	2,0	19,0	21,0	16,5	12,7
24/08/96	19,0	17,0	17,0	15,7	17,2
27/08/96	7,0	1,0	1,0	0,6	2,9
28/08/96	11,5	3,0	5,0	8,2	7,7
30/08/96	10,0	26,5	25,0	25,0	20,4
31/08/96	16,0	27,0	28,0	29,2	24,8
02/09/96	26,5	25,0	29,0	25,6	26,0
03/09/96	21,0	6,0	5,0	8,5	11,1
04/09/96	4,0			0,1	1,4
07/09/96	4,0	2,8	3,5	2,8	3,3
08/09/96	2,0	1,4	1,5	1,4	1,6
12/09/96	7,0	9,0	8,0	8,6	6,1
13/09/96	19,0	17,0	17,0	17,3	17,8
18/09/96	32,0	44,0	41,0	32,7	36,0
19/09/96		1,0	1,0	0,5	0,5
25/09/96	3,0	2,0	2,0	1,4	2,1
02/10/96	13,0	6,0	12,0	7,1	9,2
03/10/96	47,4	38,6	35,0	36,9	40,7
04/10/96	32,7	21,9	19,9	21,0	25,1
05/10/96	5,9	4,5	4,0	4,3	4,9
06/10/96		1,0	1,0	1,4	0,8
26/11/96	1,6	1,0	2,0	1,3	1,4
27/11/96	11,4	10,0	16,0	9,6	10,8

Annexe VII.4.3. Suite.....

PASTELERO 1997		Pluie journalière en mm			
No. pluviomètre	127	135	130	PG8	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	33,5	25,0	8,5	33,0	du bassin versant
17/1/97	2,0				0,7
18/1/97	13,0	10,5	10,5	10,5	11,3
19/1/97	18,0	18,5	18,5	18,5	18,3
31/1/97	4,0				1,3
1/2/97	14,0	19,0	19,0	19,0	17,3
6/3/97	1,0				0,3
7/3/97	1,0				0,3
10/3/97	12,0	17,0	21,0	20,0	18,7
20/3/97		2,0		1,5	1,0
21/3/97	6,4				2,1
30/3/97	1,8				0,6
31/3/97	1,2	2,0		1,3	1,3
1/4/97		3,0	2,0	2,8	1,8
7/4/97	4,2	2,0	4,0	3,4	3,4
14/4/97	7,0	5,0	10,0	7,2	6,8
26/4/97	12,0	16,0	12,0	11,7	12,9
27/4/97	2,0				0,7
5/5/97	1,0				0,3
7/5/97	1,0				0,3
9/5/97	24,0	17,0	14,0	14,5	18,3
10/5/97	2,0			1,0	1,0
11/5/97		1,0	1,0	0,7	0,6
21/5/97		7,0	5,0	0,5	2,3
22/5/97	1,0	2,0	5,0	0,3	1,4
23/5/97	1,0			7,1	2,7
24/5/97				2,4	0,8
11/6/97		5,0	5,0	3,3	2,8
13/6/97		3,0	2,0	1,6	1,4
17/6/97		3,0	2,0	1,1	1,3
19/6/97	8,0	2,0	2,0	1,5	3,8
20/6/97	2,0	3,0	6,0	5,2	3,6
21/6/97	3,0			0,1	1,0
26/6/97	3,0	3,0	3,0	1,6	2,5
28/6/97	21,0	24,0	22,0	21,3	21,9
29/6/97				1,5	0,5
8/7/97	1,0	3,0	2,0	1,6	1,8
9/7/97	0,0	0,0	0,0	1,3	0,4
10/7/97	2,0	3,0	4,0	3,5	2,9
11/7/97	9,0	7,0	6,0	5,8	7,2
18/7/97	5,0	1,0	1,0	2,2	2,7
19/7/97	50,0	29,0	31,0	20,6	33,4
20/7/97	21,0	27,0	18,0	25,0	23,6
21/7/97	1,0	0,0	3,0		0,6
22/7/97	0,0	11,0	12,0	10,0	7,1
29/7/97	4,0	6,0	5,0	6,0	5,2
30/7/97	1,0	1,0	3,0	2,0	1,5
7/8/97	0,0	2,0	0,0	0,3	0,6
8/8/97	4,0	2,0	2,0	2,7	2,9
9/8/97	5,0	11,0	12,0	5,9	7,4
13/8/97	3,0	4,0	4,0	2,5	3,2
14/8/97	0,0		1,0	0,1	0,1
16/8/97	0,0	4,0	2,0	3,4	2,3
21/8/97	3,0				1,0
27/8/97	3,0	1,0	0,0	0,7	1,5
28/8/97	17,0	3,0	3,0	3,4	7,8
29/8/97	0,0	4,0	4,0	5,2	3,1
30/8/97		2,0	1,0	0,1	0,6
4/9/97	3,0	8,0	10,0	9,4	7,0
6/9/97	9,0	2,0	5,0	4,7	5,5
7/9/97	9,0	12,0	8,0	2,4	7,5
8/9/97	4,0	0,0	0,0		1,3
9/9/97		2,0	5,0	3,0	1,9
11/9/97	3,0	3,0	0,0	6,0	3,7
21/9/97	3,9	5,0	7,1	5,0	4,8
22/9/97	1,5	1,0	1,5	1,0	1,2
23/9/97	5,3	19,0	28,2	19,9	15,5
24/9/97	5,3				1,8

Annexe VII.4.3. Suite.

PASTELERO 1997		Pluie journalière en mm			
No. pluviomètre	T27	T35	T30	PG8	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	33,5	25,0	8,5	33,0	du bassin versant
4/10/97	9,5	1,5	1,8	0,9	4,0
6/10/97	12,0	11,0	11,3	5,8	9,6
10/10/97	23,0	15,0	15,3	7,6	15,3
11/10/97	22,0	17,0	18,0	6,9	16,1
28/10/97		2,0	0,9	0,5	0,7
29/10/97	1,0	3,0	1,5	0,8	1,5
7/11/97	4,0	15,0	8,3	4,4	7,2
10/11/97	2,5				0,8
11/11/97	4,0				1,3
12/11/97		1,0	0,6	0,3	0,4
16/12/97	2,0				0,7
17/12/97	3,0				1,0
30/12/97	16,0				5,4

Annexe VII.4.4. Pluie moyenne du bassin versant El Tullido.

TULLIDO 1996		Pluie journalière en mm			
No. pluviomètre	T27	T26	PG6	PM5	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	18,7	17,2	50	14,1	du bassin versant
15/5/96		6,0			0,7
16/5/96					0,0
17/5/96			9,0	8,0	3,6
22/5/96		1,0			0,1
24/5/96					0,0
26/5/96					0,1
30/5/96		1,0			0,1
31/5/96	3,1		3,0	5,0	3,0
1/6/96	0,1				0,0
6/6/96			1,0	2,0	0,6
11/6/96	0,4				0,2
12/6/96	1,3		1,0		0,9
13/6/96	0,3	2,0	1,0		0,6
14/6/96	0,8				0,4
15/6/96	2,7				1,3
16/6/96	2,6	5,5			1,9
24/6/96	0,1				0,0
25/6/96	1,5				0,7
26/6/96	0,9	1,5	1,0	1,0	1,0
29/6/96	6,9	4,5	11,6	12,3	8,7
30/6/96		5,0			0,6
5/7/96	0,3	4,0	0,3	0,3	0,7
6/7/96	10,4		10,5	10,0	9,2
7/7/96	0,2	4,0	0,2	0,2	0,6
8/7/96	4,4		3,1	3,0	3,4
9/7/96	0,1		0,1		0,1
10/7/96	1,2	5,0	0,9	0,8	1,5
11/7/96	5,3	8,0	3,8	3,7	4,7
12/7/96	2,2		1,6	1,5	1,7
13/7/96	0,1		0,1	0,1	0,1
14/7/96	6,2	1,0	6,0	4,7	5,3
15/7/96	2,8	2,0	2,7	2,1	2,6
16/7/96	0,2		0,2	0,1	0,2
25/7/96	0,1				0,0
1/8/96	0,3		2,2	1,5	0,9
2/8/96	0,3	5,0	2,2	1,5	1,5
3/8/96	1,4	4,0	4,0	5,0	2,9
4/8/96		2,5			0,3
5/8/96	2,7	2,5	3,6	3,7	3,1
6/8/96	15,7	10,0	21,0	21,5	17,3
6/8/96	11,0		14,8	15,0	11,4
7/8/96	5,1	17,0	6,8	7,0	7,2
8/8/96	2,0	4,0	2,0	2,0	2,2
9/8/96	2,7		2,7	2,7	2,4
12/8/96		1,0			0,1
13/8/96	35,0	59,0	36,0	35,0	37,9
14/8/96	18,0	7,0	18,6	17,9	16,9
15/8/96			1,5	8,5	1,7
18/8/96	17,4	11,0	6,5	6,0	12,1
20/8/96	3,0	4,0	1,0	0,5	2,2
23/8/96	15,4	18,0	17,0	18,0	16,5
24/8/96	13,3	12,0	16,5	16,5	14,8
27/8/96	2,2				1,0
28/8/96	3,2	5,0	2,5	1,5	3,0
29/8/96	0,1	3,0	3,0	2,0	1,5
30/8/96	18,4		16,4	15,4	14,4
31/8/96	32,0	16,5	32,5	31,5	30,3
1/9/96	0,1				0,0
2/9/96	36,8		28,0	40,0	30,9
3/9/96	7,9	63,5	9,0	7,0	14,2
4/9/96	0,2	6,0			0,8
7/9/96	1,5		5,0	4,5	2,7
8/9/96	4,9	1,0	4,0	1,5	3,7
12/9/96	9,0		14,0	16,0	10,4
13/9/96	13,9	13,0	15,0	12,0	13,8
14/9/96		11,0			1,2
18/9/96	31,3		27,0	22,0	25,3
19/9/96	0,6	17,0	0,0	1,5	2,4
2/10/96	8,5		8,9	9,2	7,8
3/10/96	51,3	29,0	54,0	55,0	50,1
4/10/96	27,8	38,0	12,0	20,0	23,6
5/10/96	3,3	25,0	2,0	3,0	5,3
6/10/96	1,1	5,0	1,0	1,0	1,5
26/11/96	3,0		4,0	2,0	2,8
27/11/96	15,0	13,0	20,0	11,0	15,5

Annexe VII.4.4. Suite.....

TULLIDO 1997		Pluie journalière en mm			
No. pluviomètre	T27	T26	PG6	PM5	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	18,7	17,2	50	14,1	du bassin versant
07/01/97	2,6		5,0	4,0	3,1
18/01/97	5,9		12,0	10,0	7,5
19/01/97	10,4		22,0	18,0	13,4
20/01/97		26,0			2,9
01/02/97	17,3	19,0	19,0	14,0	17,4
05/03/97	0,5		0,6	0,5	0,5
07/03/97	0,5		0,6	1,0	0,5
09/03/97	0,5		0,6	1,0	0,5
10/03/97	27,5	21,0	31,7	29,8	28,2
11/03/97	0,5	1,0	0,6	0,5	0,6
19/03/97	0,5	16,0			2,0
20/03/97	7,0		7,0	6,5	6,1
30/03/97	2,0		1,5	1,5	1,6
31/03/97	0,5		1,0	0,5	0,6
01/04/97	0,5		0,5	0,5	0,4
02/04/97	0,5		1,0	1,0	0,7
07/04/97	5,5		5,0	5,0	4,7
14/04/97	10,0	6,0	9,0	10,0	9,5
26/04/97	14,0	16,0	14,0	14,0	14,2
09/05/97		31,0			3,4
10/05/97		2,0			0,2
22/05/97	4,0	6,0	4,2	4,1	4,3
29/05/97		1,0			
05/06/97	2,0		2,0	0,0	1,5
12/06/97	7,0	2,0	7,0	6,0	6,3
16/06/97		3,0			0,3
17/06/97	4,0				1,9
18/06/97		4,0			0,4
19/06/97	2,0		4,0	4,0	2,6
20/06/97		2,0			0,2
21/06/97			2,0	0,0	0,5
26/06/97	9,0	10,0	6,0	10,0	9,0
28/06/97	19,0	19,0	17,0	20,0	16,6
02/07/97		4,0			0,4
08/07/97	3,0	0,0	3,0	0,0	2,2
09/07/97		6,0	0,0	0,0	0,7
10/07/97	6,0	2,0	5,0	7,0	5,4
11/07/97	14,0	10,0	14,0	12,0	13,3
18/07/97	8,0	12,0	6,0	9,0	8,1
19/07/97	11,0		11,0	3,0	8,6
20/07/97	14,5	11,0	16,0	15,0	14,6
21/07/97	0,5		0,0	0,0	0,2
22/07/97	4,5	10,0	5,0	5,0	5,3
29/07/97	4,5	3,0	5,0	5,0	4,5
30/07/97	8,5	10,0	9,0	8,0	8,7
04/08/97	0,5				0,2
05/08/97	0,5				0,2
06/08/97	1,5	5,0			1,3
07/08/97	6,5	0,0	4,0	4,0	4,7
08/08/97	1,0	1,0	1,0	0,0	0,8
09/08/97	2,5	2,0	0,0	0,0	1,4
14/08/97	9,0	1,0	7,0	6,0	7,1
15/08/97		1,0			0,1
16/08/97	0,5		1,0	5,0	1,3
26/08/97		4,0			0,4
27/08/97	1,0	0,0	1,0	1,0	0,9
28/08/97		4,0			0,4
29/08/97	5,0	2,0	5,0	0,0	3,9
30/08/97	2,0		2,0	3,0	1,9
01/09/97		2,0	0,0	0,0	0,2
06/09/97	16,0	7,0	16,0	17,0	16,1
07/09/97	12,5	28,0	11,5	11,5	13,8
08/09/97	6,0	10,0	5,5	5,5	6,2
09/09/97	2,0	0,0	2,0	2,0	1,8
11/09/97	5,0		6,0	4,0	4,8
12/09/97		4,0			0,4
21/09/97	4,0	3,5	4,0	4,0	3,9
22/09/97	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Annexe VII.4.4. Suite.

TULLIDO 1997		Pluie journalière en mm			
No. pluviometre		T27	T26	PG6	PM5
Superficie du bassin en %		18,7	17,2	50	14,1
					Pluie moyenne du bassin versant
23/09/97	15,0		13,5	14,0	14,0
04/10/97	5,5			5,0	5,0
06/10/97	0,5			0,5	0,5
10/10/97	20,2			19,0	19,0
11/10/97	11,3			10,5	11,0
12/10/97			37,0		
28/10/97	2,0		2,0	2,0	2,0
29/10/97			2,0		
07/11/97	6,0			4,0	4,0
10/11/97	3,5			2,5	2,0
11/11/97	6,5			5,0	4,0
12/11/97	0,5			0,5	0,5
13/12/97	1,0				
14/12/97	0,5				
15/12/97	0,5				
30/12/97			18,0		

Annexe VII.4.5. Pluie moyenne du bassin versant El Viejo.

EL VIEJO 1996		Pluie journalière en mm		
No. pluviomètre		T34	PG7	PM7
Superficie du bassin en %		23,0	69,4	7,6
				Pluie moyenne du bassin versant
31/5/96	9,0	5,5	6,0	6,3
12/6/96		7,4	7,1	5,7
13/6/96	1,0	1,6	1,0	1,4
14/6/96	1,0	1,0	1,0	1,0
15/6/96	15,0	12,5	12,0	13,0
16/6/96	14,0	12,0	10,0	12,3
25/6/96	13,0	12,0	16,2	12,5
26/6/96		1,5	1,2	1,1
30/6/96	7,0	7,5	7,2	7,4
5/7/96		2,5		1,7
6/7/96	2,0	1,0		1,2
7/7/96	3,0	2,0		2,1
8/7/96		1,0		0,7
9/7/96	3,0	2,0		2,1
10/7/96	6,0	6,0		6,0
11/7/96	45,5	50,5	47,5	49,1
12/7/96		0,5		0,3
14/7/96	15,0	13,8	14,0	14,1
15/7/96	1,5	0,9		1,0
16/7/96		0,3		0,2
18/7/96		0,5		0,3
25/7/96	0,5	0,5		0,5
1/8/96	2,0	7,0	3,4	5,6
3/8/96		1,0		0,7
4/8/96		1,0		0,7
5/8/96	3,0	2,0	2,3	2,3
7/8/96	44,0	31,5	23,1	33,7
8/8/96				0,0
9/8/96	1,0	0,5	0,5	0,6
12/8/96		0,5		0,3
13/8/96	25,0	27,5	20,2	26,4
14/8/96	23,0	23,5	26,0	23,6
18/8/96	2,0	1,5	3,3	1,8
20/8/96	32,5	31,0	25,6	30,9
23/8/96	0,5	20,0	16,6	15,4
24/8/96	20,0	18,0	15,7	18,3
28/8/96	14,5	8,5	9,6	10,0
29/8/96	9,5	2,5	1,0	4,0
30/8/96	2,5	8,5	3,5	6,7
31/8/96	10,0	29,5	10,0	23,5
1/9/96	29,0	18,5	20,0	21,0
3/9/96	23,5	14,5	18,0	16,8
4/9/96	9,0			2,1
7/9/96	3,0	7,5		5,9
12/9/96	4,0	9,7	8,3	8,3
13/9/96	14,0	15,0	16,3	14,9
14/9/96		0,5		0,3
18/9/96	13,0	15,0	24,6	15,3
19/9/96	0,0	0,5		0,3
25/9/96	21,0	14,5	12,3	15,8
2/10/96		7,0	7,8	5,5
3/10/96	15,9	17,8		16,0
4/10/96	38,7	34,0	38,4	35,4
5/10/96	27,3	24,0	25,7	24,9
27/11/96	13,0	17,2	15,0	16,1

Annexe VII.4.5. Suite.....

EL VIEJO 1997		Pluie journalière en mm		
No. pluviometre	T34	PG7	PM7	Pluie moyenne
Superficie du bassin en %	23,0	69,4	7,6	du bassin versant
17/1/97	6,8	6,0	6,3	7,6
18/1/97	14,5	14,7	14,0	14,6
19/1/97	9,7	9,9	8,6	9,8
23/1/97		0,5		0,3
1/2/97	17,0	15,9	14,9	16,1
10/3/97	16,0		20,3	5,2
11/3/97		0,5		0,3
12/3/97	2,0	7,0	1,2	5,4
21/3/97	7,0	7,0	5,3	6,9
30/3/97	2,0	2,0		1,8
31/3/97	2,0	2,0		1,8
7/4/97	3,0	3,5	5,8	3,6
8/4/97		0,5		0,3
14/4/97	8,0	9,5	7,9	9,0
17/4/97			0,4	0,0
26/4/97	11,0	12,0	9,8	11,6
9/5/97	29,5	30,0	23,3	29,4
10/5/97	2,5	3,0		2,7
11/5/97	1,5	1,0	1,8	1,2
17/5/97			0,6	0,0
21/5/97	1,5		0,4	0,4
22/5/97		4,0	3,9	3,1
23/5/97	9,5	10,0	10,0	9,9
24/5/97	3,5	1,0	0,9	1,6
5/6/97	0,0		0,7	0,1
10/6/97			3,4	0,3
11/6/97	5,0		3,4	1,4
13/6/97	1,0		0,8	0,3
14/6/97			0,8	0,1
17/6/97	1,0		1,0	0,3
19/6/97	1,0		0,9	0,3
20/6/97	3,0		1,0	0,8
21/6/97			4,8	0,4
26/6/97	2,0	4,5	0,3	3,6
27/6/97	4,0	0,5		1,3
28/6/97	26,0	30,0		26,8
29/6/97	1,0	4,0		3,0
27/7/97			0,3	0,0
7/7/97			1,7	0,1
8/7/97	3,0		3,7	1,0
9/7/97	3,0		1,6	0,8
10/7/97	4,0		6,4	1,4
11/7/97	10,0		5,6	2,7
18/7/97		4,0	4,3	3,1
19/7/97	13,0		1,0	3,1
20/7/97	42,0	45,0	45,0	44,3
21/7/97	6,0	4,0	3,5	4,4
22/7/97	2,0	7,0	5,0	5,7
23/7/97	3,0		1,0	0,8
28/7/97			0,8	0,1
29/7/97	15,0		11,3	4,3
30/7/97	0,0		0,2	0,0
4/8/97		1,5		1,0
7/8/97	6,0	0,5		1,7
8/8/97	0,0	0,5		0,3
9/8/97	35,0	12,0	22,5	18,1
10/8/97	2,0	1,0	2,6	1,4
13/8/97	11,0	11,0		10,2
14/8/97	1,0			0,2
16/8/97	8,0	6,5	6,1	6,8
27/8/97	2,0	2,0	3,9	2,1
28/8/97	10,0	10,0	6,2	9,7
29/8/97	5,0	4,0	3,2	4,2
31/8/97	1,0			0,2
4/9/97	2,0	3,5		2,9
5/9/97			4,8	0,4
6/9/97	5,0	0,5		1,5

Annexe VII.4.5. Suite.

EL VIEJO 1997		Pluie journalière en mm		
No. pluviomètre	T34	PG7	PM7	Pluie moyenne du bassin versant
Superficie du bassin en %	23,0	69,4	7,6	
7/9/97	6,0	12,0	5,6	10,6
8/9/97	0,0		6,4	0,5
9/9/97	2,0			0,5
11/9/97	4,0	4,0	3,9	4,0
21/9/97	5,5	5,0	4,5	5,1
22/9/97	2,5	2,0	1,5	2,1
23/9/97	20,5	18,0	17,5	18,5
24/9/97	22,5	20,0	19,5	20,5
4/10/97	1,0	1,5	1,0	1,3
6/10/97	1,0	1,0	1,0	1,0
10/10/97	18,0	25,6	17,6	23,2
11/10/97	13,0	12,4	12,8	12,6
28/10/97		1,5	2,3	1,2
7/11/97	7,0	6,5	6,0	6,6
8/11/97	0,5	0,5		0,5
10/11/97	2,5	2,5	2,0	2,5
11/11/97	6,0	8,0	8,0	6,0
14/11/97	0,5	0,5		0,5
14/12/97	0,5	0,5		0,5
22/12/97	0,5	0,5		0,5
23/12/97	0,5	0,5		0,5

Annexe VII.5.1. Caractéristiques des crues des bassins versants pour l'année 1996.

EL VIEJO (176 ha)

Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
11/07/96 20:30	S	47,1	108,0	20	60	6365	7,7	1768	3940	2,23
07/08/96 00:00	—	24,2	—	—	—	2603	6,1	—	—	—
13/08/96 19:00	C	26,4	69,0	10	170	512	1,1	50	225	4,48
14/08/96 19:50	S	23,6	63,0	20	70	2488	6,0	592	1329	2,24
20/08/96 18:50	S	30,9	60,0	30	60	2424	4,5	673	1147	1,70
23/08/96 20:00	C	15,4	27,0	30	100	324	1,2	54	117	2,16
24/08/96 20:00	C	18,3	15,5	—	310	222	0,7	12	27	2,22
31/08/96 21:20	C	15,8	10,5	100	190	539	1,9	47	78	1,66
09/02/96 14:32	—	21,0	—	—	—	1804	4,9	—	—	—
03/09/96 16:40	D	16,8	21,7	—	160	401	1,4	42	98	2,36
07/09/96 14:20	S	2,4	11,2	10	170	154	3,6	15	52	3,40
12/09/96 18:30	C	8,3	20,1	10	100	58	0,4	10	25	2,59
13/09/96 20:40	C	13,3	18,0	30	190	327	1,4	29	50	1,74
18/09/96 18:00	C	15,3	26,0	20	110	214	0,8	32	117	3,59
25/09/96 22:00	S	14,8	36,0	40	70	229	0,9	54	150	2,75
03/10/96 16:50	C	69,1	Ruissellement subsuperficiel			397	0,3	Ruissellement subsuperficiel		

EL TULLIDO (398 ha)

Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
06/08/96 14:58	—	17,3	—	—	—	4580	6,6	—	—	—
07/08/96 20:44	S	7,2	43,6	30	60	325	1,1	90	183	2,03
18/08/96 20:10	C	10,8	39,6	30	250	825	1,9	55	333	6,05
23/08/96 19:40	S	16,5	17,8	70	170	1089	1,7	107	242	2,26
24/08/96 23:00	C	11,4	21,5	80	160	3834	8,5	399	813	2,03
30/08/96 20:40	C	14,4	33,6	20	40	706	1,2	107	361	3,37
31/08/96 13:30	S	20,2	56,4	90	120	11325	14,1	1049	3200	3,05
31/08/96 21:00	S	8,7	18,9	30	60	912	2,6	304	578	1,90
02/09/96 15:00	S	28,6	99	140	210	8483	7,5	673	3849	5,72
12/09/96 19:20	C	8,0	16,4	140	200	540	1,7	45	108	2,40
18/09/96 17:42	—	25,3	—	—	—	995	1,0	—	—	—

EL MUERTO (15 ha)

Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
07/08/96 20:26	S	28,5	94,8	20	40	775	18,1	323	590	1,83
13/08/96 17:01	S	24,6	42	20	100	150	4,1	25	84	3,36
14/08/96 20:03	—	12,8	26	—	—	96	5,0	—	—	—
18/08/96 18:00	C	15	37,2	20	150	47	2,1	5	18	3,50
23/08/96 19:42	D	15,4	38,2	—	130	117	5,1	15	48	3,17
24/08/96 19:46	C	16	30	60	130	117	4,9	15	57	3,78
27/08/96 22:36	S	5	26,7	20	50	30	4,0	10	23	2,25
30/08/96 20:20	C	16,2	34,8	30	120	197	8,1	27	86	3,14
31/08/96 19:42	C	20,2	17,2	30	180	212	7,0	20	68	3,48
02/09/96 15:12	—	25,8	51,2	—	—	448	11,6	—	—	—
18/09/96 17:57	D	25,6	33,3	—	80	180	4,7	38	86	2,29

Type de crue: S simple ; D double ; C complexe.

Annexe VII.5.2. Caractéristiques des crues des bassins versants pour l'année 1997.

CARBONERAS (106 ha)

Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
19/07/97 13:30	S	30,2	70,2	40	70	1358	4,2	323	863	2,67
21/07/97 03:00	C	18,3	40,5	20	100	215	1,1	36	92	2,56
11/10/97 15:10	C	6,7	37,8	120	150	102	1,4	11	33	2,87

EL VIEJO (176 ha)

Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
09/08/97 17:50	D	14,0	16,0	—	90	2530	10,3	469	1050	2,24
24/09/97 20:10	S	20,5	66,0	40	150	980	2,7	109	133	1,22
10/10/97 16:50	S	23,2	75,0	20	80	210	0,5	44	58	1,33

EL TULLIDO (398 ha)

Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
10/03/97 17:40	S	28,2	90	20	00:40	3930	3,5	409	2833	6,92

EL MUERTO (15 ha)

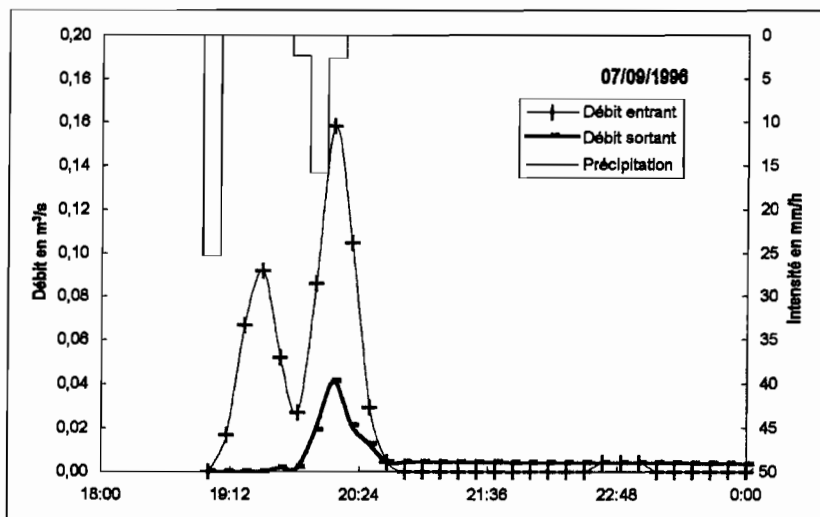
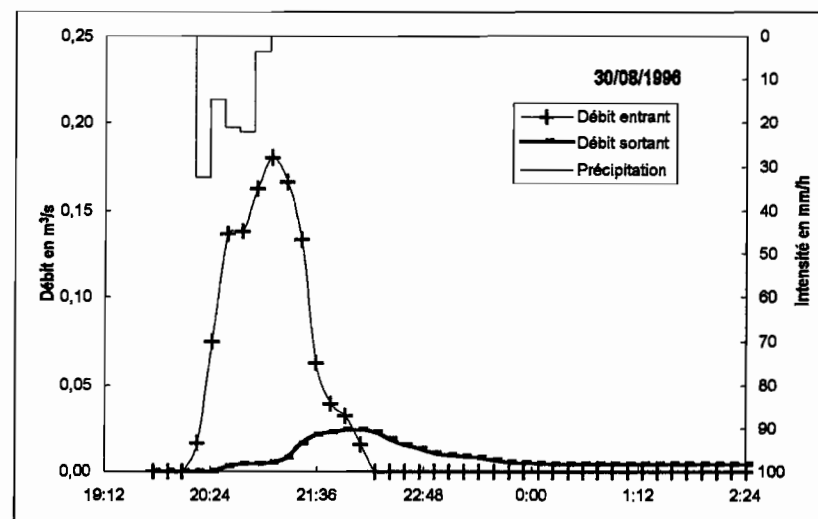
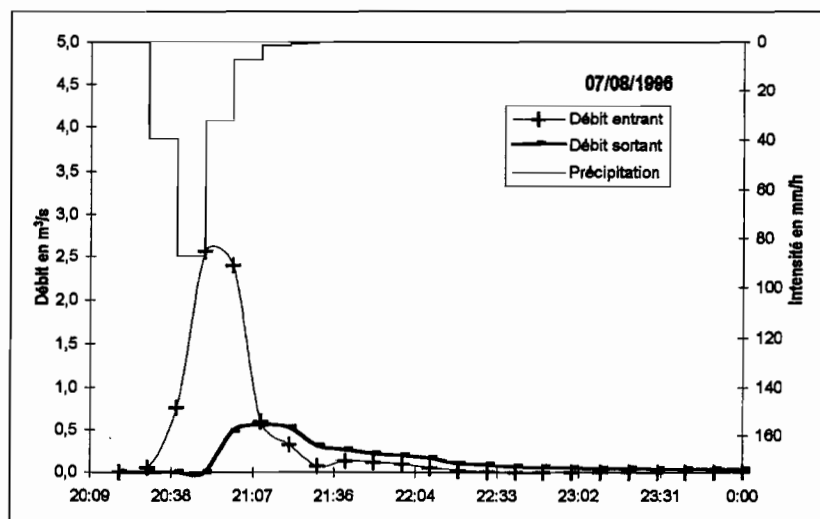
Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
19/07/97 13:10	S	33,3	70,2	30	70	72	1,4	17	48	2,78
10/10/97 17:10	C	13,2	45	30	110	110	5,6	17	24	1,45
11/10/97 16:50	C	8,7	45,6	20	160	186	14,2	19	26	1,33

PASTELERO (168 ha)

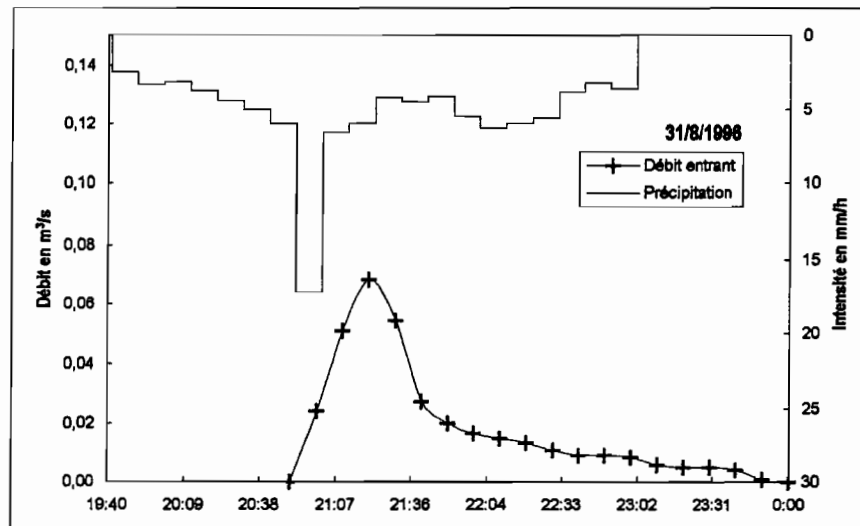
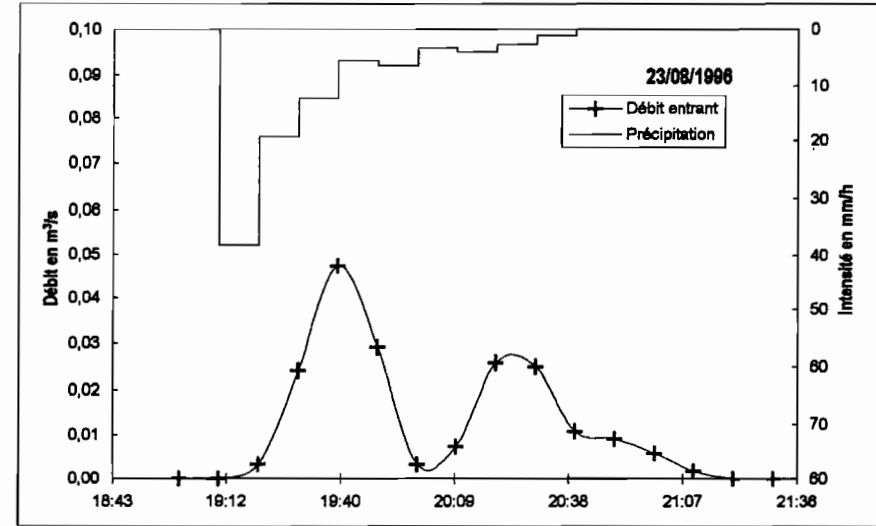
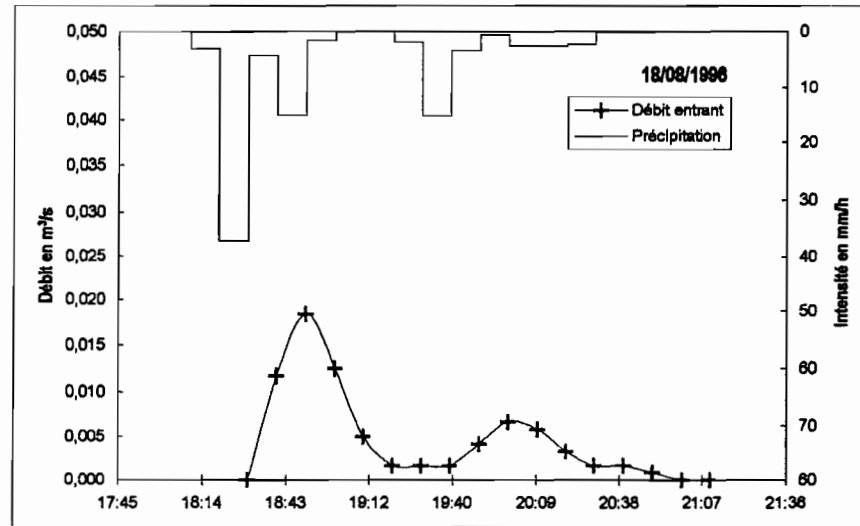
Date	Type	Pm	I max (10')	T. montée	T. base	Vr	Kr	Q moy	Q max	Qmax/Qmoy
		mm	mm/h	mn	mn	m ³	%	l/s	l/s	
19/07/97 12:50	D	24,8	36,3	30	110	253	0,6	38	122	3,19
19/07/97 15:50	S	8,6	12	40	120	141	1,0	20	68	3,48
21/07/97 02:10	C	23,6	54,4	80	220	756	1,9	57	155	2,70
22/07/97 13:40	D	2,4	55	20	130	205	5,1	26	58	2,22
23/09/97 18:30	S	5,6	15	30	60	250	2,7	69	122	1,75

Type de crue : S simple ; D double ; C complexe.

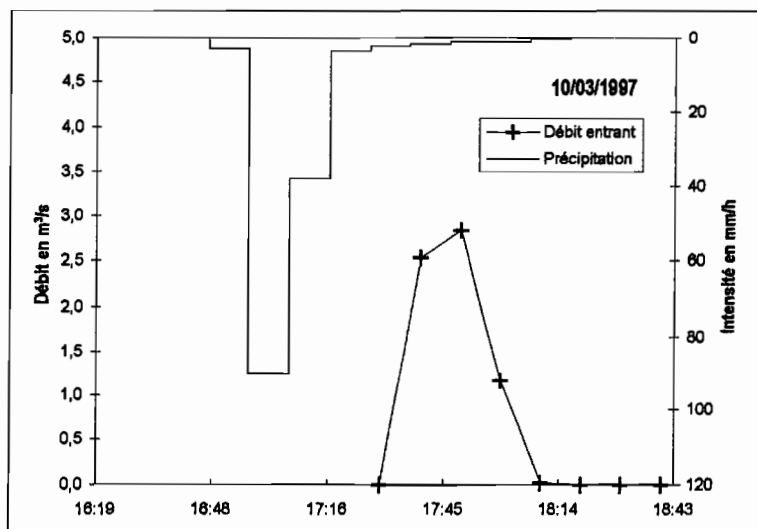
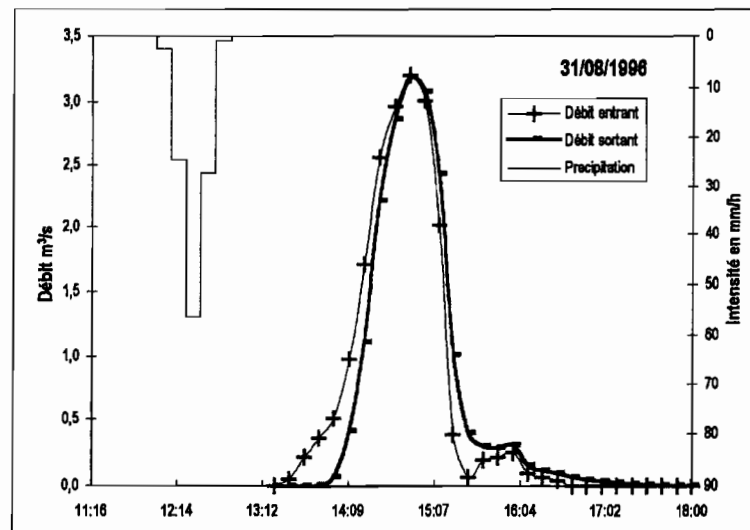
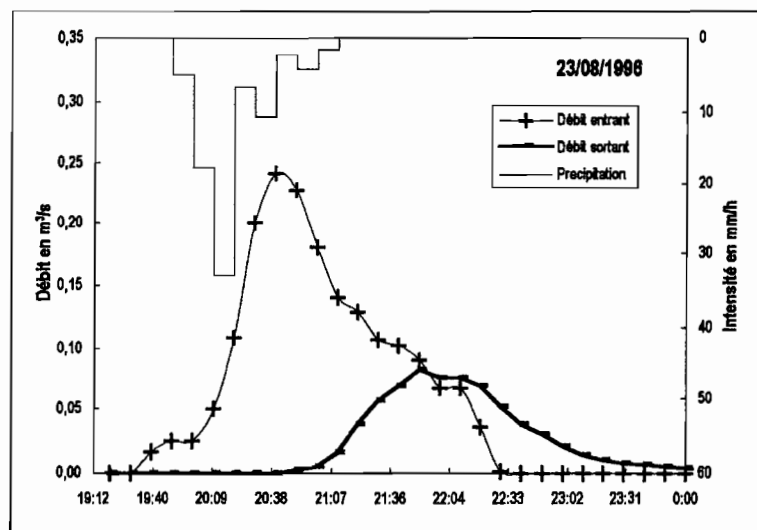
Annexe VII.6.1. Hydrogrammes et hyétogrammes des crues types du bassin versant Carboneras.



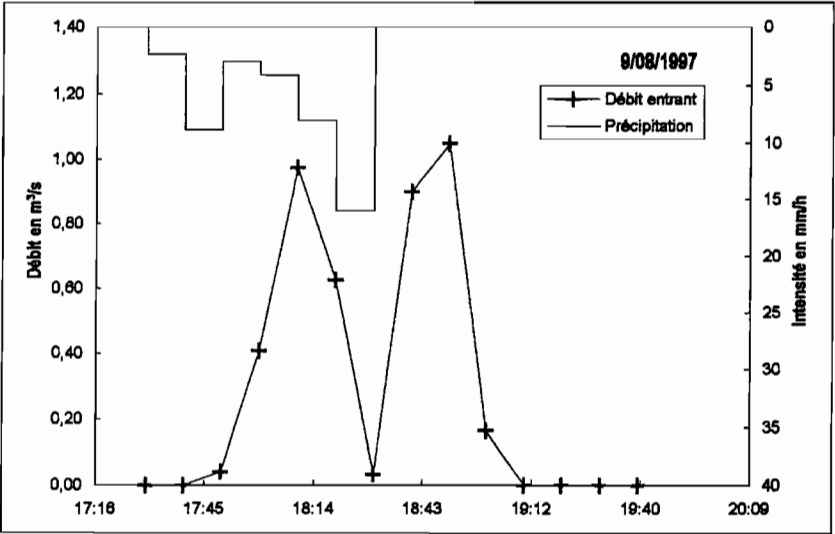
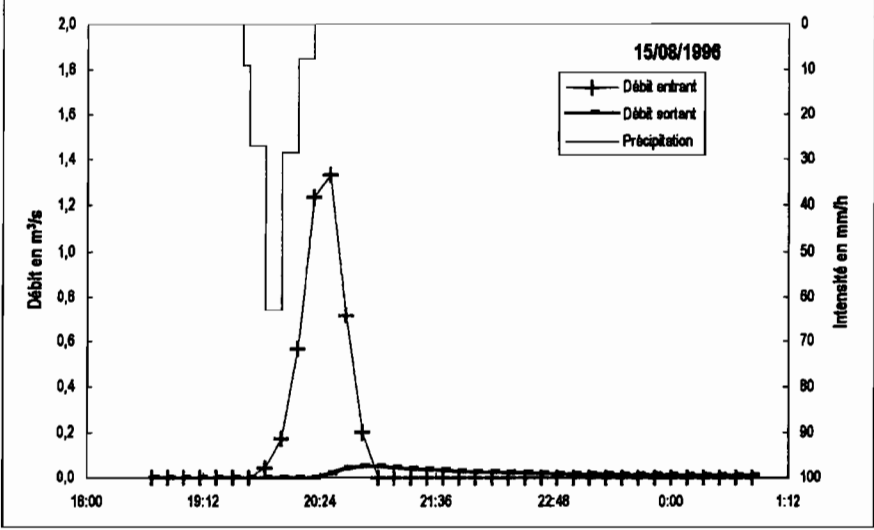
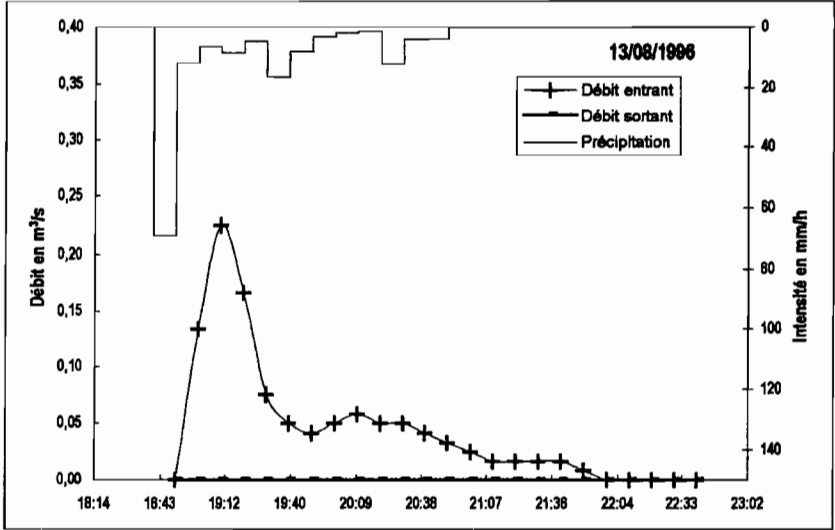
Annexe VII.6.2. Hydrogrammes et hyétogrammes des crues types du bassin versant El Muerto.



Annexe VII.6.3. Hydrogrammes et hyétogrammes des crues types du bassin versant El Tullido.



Annexe VII.6.4. Hydrogrammes et hyetogrammes des crues types du bassin versant El Viejo.



ANNEXES DU CHAPITRE 8

Données pluviométriques et hydrométriques collectées sur les bassins versants : VIII.1. à VIII.5.

**Annexe VIII.1. Données pluviométriques et hydrométriques collectées
sur le bassin versant de Carboneras (1996).**

DATE / HEURE CARBONERAS	PLUIE	DUREE	IL	PUIL	Lr	INDICE	INTENSITE DE PLUIE EN			
	mm	mn	mm/h	mm	mm	IK1 mm	10 mn mm/h	15 mn mm/h	30 mn mm/h	
29-05-96 21:15	1,3	41				0,0	3,0	2,8	2,0	
01-06-96 18:53	8,6	8				1,0	51,6	34,4	17,2	
12-06-96 18:08	1,9	23				3,2	7,8	6,8	3,8	
12-06-96 22:02	1,0	28				5,0	4,2	2,8	2,0	
13-06-96 20:39	4,8	24				5,5	22,8	17,2	9,6	
15-06-96 15:58	23,0	59	25	17	0,71	8,6	51,0	42,4	36,2	
15-06-96 21:32	4,2	128				30,8	10,2	8,4	5,8	
16-06-96 22:57	7,2	141				31,5	8,4	7,6	5,0	
25-06-96 14:31	1,1	23				16,3	4,8	4,0	2,2	
25-06-96 18:49	2,4	38				17,1	9,6	7,6	4,2	
30-06-96 18:04	3,8	52				11,9	12,0	11,2	7,0	
06-07-96 19:28	4,3	155				8,5	12,6	10,0	6,0	
07-07-96 18:07	3,9	30				11,8	15,6	12,8	7,8	
08-07-96 14:03	1,2	10				14,3	7,2	4,8	2,4	
10-07-96 21:51	1,8	108				12,3	2,4	2,0	1,4	
11-07-96 19:24	6,0	110	23	0	0,01	12,9	12,6	10,8	6,8	
11-07-96 23:07	2,8	51				16,6	7,2	6,0	4,6	
14-07-96 15:53	1,2	13				18,3	6,0	4,8	2,4	
14-07-96 20:37	8,8	54	20	3	0,04	17,2	20,4	17,2	8,8	
14-07-96 22:55	4,3	90				25,7	6,6	5,6	4,0	
16-07-96 01:58	1,0	12				26,8	5,4	4,0	2,0	
24-07-96 23:45	1,0	43				11,4	2,4	2,4	1,6	
08-08-96 15:38	3,2	45				3,5	6,0	6,0	4,8	
07-08-96 20:29	28,1	53	26	24	4,86	5,9	87,8	87,6	53,6	
07-08-96 22:33	5,5	137				33,8	10,8	9,2	6,2	
13-08-96 17:46	3,1	18				22,0	15,0	11,6	6,2	
13-08-96 20:11	19,2	103	17	13	2,01	24,8	47,4	45,6	29,0	
14-08-96 14:34	1,2	8				40,8	7,2	4,8	2,4	
14-08-96 20:18	10,1	60	12	7	0,29	41,0	25,8	20,8	14,8	
18-08-96 18:05	1,5	17				34,6	6,6	5,6	3,0	
18-08-96 19:27	1,2	10				35,9	7,2	4,6	2,4	
20-08-96 18:35	4,6	49				30,4	19,8	14,0	7,4	
21-08-96 18:14	1,5	14				31,8	8,4	6,0	3,0	
23-08-96 19:52	15,1	92	16	10	0,31	27,0	31,2	30,0	22,4	
24-08-96 05:14	1,0	17				40,5	3,6	3,6	2,0	
24-08-96 19:37	15,7	237	13	7	0,28	39,1	31,8	23,6	14,0	
27-08-96 22:27	4,5	21				40,1	21,6	16,4	9,0	
28-08-96 22:18	5,6	36	12	4	0,52	40,4	20,4	14,4	10,0	
30-08-96 20:13	15,7	50	13	14	2,03	38,0	32,4	28,8	23,4	
31-08-96 17:39	1,2	42				48,1	3,0	2,4	2,0	
31-08-96 19:55	21,0	279	10	5	0,61	48,9	21,0	17,2	12,4	
02-09-96 15:03	25,3	98	8	24	3,46	59,2	43,8	41,2	34,0	
04-09-96 01:13	5,1	159				73,3	5,4	5,2	4,4	
07-09-96 18:56	8,0	74	9	6	0,59	53,9	25,4	17,0	8,5	
09-09-96 02:59	1,5	18				48,7	7,8	6,0	3,0	
09-09-96 20:45	1,1	28				47,6	5,4	3,6	2,2	
12-09-96 17:57	3,2	97				36,5	9,0	6,4	4,0	
13-09-96 15:28	4,7	126				36,3	7,8	7,2	4,2	
13-09-96 20:51	7,2	128				40,1	13,2	10,8	7,2	
18-09-96 17:56	21,8	267	16	9	0,36	29,0	37,8	32,8	22,2	
02-10-96 18:18	1,2	55				12,5	3,6	3,2	2,0	
03-10-96 01:02	2,2	112				13,3	2,4	2,0	1,8	
03-10-96 04:55	8,1	262				15,3	3,0	3,2	3,0	
03-10-96 12:41	69,5	1831				22,6	9,6	9,2	6,0	
04-10-96 23:39	11,7	539				79,6	6,0	5,6	4,8	
27-11-96 13:55	3,5	11				0,4	18,6	14,0	7,0	
27-11-96 19:56	1,7	7				3,8	10,2	6,8	3,4	

**Annexe VIII.2. Données pluviométriques et hydrométriques collectées
sur le bassin versant de El Muerto (1996).**

DATE / HEURE CARBONERAS	PLUIE	DUREE	IL	PUIL	Lr	INDICE IK1	INTENSITE DE PLUIE EN		
	mm	mn					10 mn	15 mn	30 mn
	mm	mn	mm/h	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	mm/h
31-05-96 18:49	1,30	13				0,00	7,20	5,20	2,60
01-06-96 18:58	3,00	16				1,18	17,40	12,00	8,00
15-06-96 18:20	7,00	43				1,04	24,00	19,20	13,00
15-06-96 21:43	2,40	51				7,86	3,60	3,60	3,40
16-06-96 23:03	4,80	128				9,23	6,60	6,40	4,80
25-06-96 16:50	1,90	33				5,81	8,40	6,40	3,60
27-06-96 19:33	1,10	9				8,29	8,60	4,40	2,20
30-06-96 18:06	4,00	58				5,51	11,40	9,60	7,00
30-06-96 21:05	2,10	40				9,39	7,80	5,20	2,80
06-07-96 15:07	1,60	8				8,47	9,60	6,40	3,20
06-07-96 19:39	2,60	24				7,91	13,20	9,60	5,20
06-07-96 21:06	2,20	66				10,45	9,60	6,80	3,40
08-07-96 13:54	3,40	69				10,67	12,00	10,40	5,80
10-07-96 21:52	2,00	122				11,15	1,60	1,60	1,20
11-07-96 19:11	6,20	110				12,03	11,40	10,00	7,00
11-07-96 22:53	2,60	37				17,95	7,80	6,40	4,80
14-07-96 21:15	2,60	13				15,33	13,20	10,40	5,20
14-07-96 22:50	4,20	75				17,81	8,60	6,00	4,20
06-08-96 15:43	4,30	42				2,27	9,60	8,80	7,80
07-08-96 20:26	28,50	44	25	24	5,17	5,83	94,80	85,60	54,40
07-08-96 22:42	6,40	139				34,01	12,00	6,80	5,80
09-08-96 20:26	2,40	15				33,40	13,20	9,60	4,80
13-08-96 17:01	24,60	293	17	15	1,00	24,34	42,00	42,00	29,80
14-08-96 20:03	12,80	120	11	10	0,64	43,73	25,80	18,00	14,40
16-08-96 18:00	15,00	141	13	11	0,31	38,22	37,20	28,00	19,00
20-08-96 18:44	4,80	52				43,44	10,20	9,20	8,80
23-08-96 19:42	15,40	85	13	11	0,78	35,59	38,40	32,80	23,40
24-08-96 4:51	1,00	19				49,08	3,00	3,20	2,00
24-08-96 19:46	16,00	235	10	5	0,78	47,07	30,00	22,80	13,40
27-08-96 22:36	5,00	13	11	5	0,20	46,17	27,00	20,00	10,00
28-08-96 22:49	2,30	30				46,26	9,60	7,60	4,60
30-08-96 20:20	16,20	64	12	13	1,31	40,17	34,80	27,20	17,20
31-08-96 17:43	1,00	17				51,57	4,20	3,60	2,00
31-08-96 19:42	20,20	271	9	3	1,41	52,13	17,40	14,00	10,00
02-09-96 15:12	25,80	100	8	23	2,99	80,34	51,00	45,20	34,20
04-09-96 1:08	5,90	174	6	0		74,76	5,40	5,60	4,60
07-09-96 18:53	3,40	72				55,51	10,80	7,60	3,80
09-09-96 3:12	3,00	11				51,49	16,80	12,00	6,00
12-09-96 18:33	3,60	66				37,87	13,20	9,60	5,40
13-09-96 15:43	5,80	117				38,15	13,80	9,60	5,60
13-09-96 21:01	6,40	120				42,99	11,40	9,60	6,80
18-09-96 17:57	25,60	298	15	15	1,20	30,34	33,60	30,00	27,60
02-10-96 18:27	5,40	40				13,77	18,00	16,00	10,40
03-10-96 1:02	2,50	107				18,85	1,60	2,00	1,60
03-10-96 5:01	8,10	248				20,80	5,40	4,40	3,40
03-10-96 12:26	62,00	1687				28,02	9,60	9,60	8,40
04-10-96 17:42	2,90	109				79,89	4,20	4,00	3,20
04-10-96 23:39	12,80	556				80,56	4,80	4,40	4,00
27-11-96 13:54	3,50	13				0,44	19,80	14,00	7,00
27-11-96 19:56	1,60	6				3,84	9,60	6,40	3,20

**Annexe VIII.3. Données pluviométriques et hydrométriques collectées
sur le bassin versant de El Tullido (1996).**

DATE / HEURE CARBONERAS	PLUIE	DUREE	IL	PUIL	Lr	INDICE	INTENSITE DE PLUIE EN		
	mm	mn	mm/h	mm	mm	IK1 mm	10 mn mm/h	15 mn mm/h	30 mn mm/h
29-5-96 19:28	1,90	133				0,00	3,60	2,80	2,40
31-5-96 18:28	3,10	14				1,56	18,00	12,40	6,20
15-6-96 16:19	1,90	71				1,05	4,20	4,00	3,40
16-6-96 23:32	2,40	80				2,59	4,80	4,80	2,80
28-6-96 17:55	1,70	37				1,54	9,60	6,40	3,20
29-6-96 17:43	4,20	69				2,83	11,40	10,40	6,80
29-6-96 21:00	2,40	70				7,04	7,20	5,20	3,00
6-7-96 15:14	1,70	11				4,80	9,80	6,80	3,40
6-7-96 19:43	8,40	151				6,36	18,60	13,20	7,40
6-7-96 14:11	4,10	21				12,38	21,00	15,60	8,20
11-7-96 22:35	3,20	68				11,79	4,80	4,40	3,80
12-7-96 15:57	1,90	20				13,94	9,00	7,20	3,80
14-7-96 17:13	3,30	28				12,90	12,60	10,40	6,60
15-7-96 0:58	2,50	53				15,69	4,80	4,40	3,80
25-7-96 0:03	1,70	51				6,72	6,00	4,40	2,60
5-8-96 23:44	1,60	55				2,54	4,80	4,00	2,00
6-8-96 14:58	18,40	62	18,46	9,16	1,15	3,88	31,20	28,80	19,40
7-8-96 20:34	10,40	43	15,27	8,30	0,08	19,70	43,80	34,40	19,80
8-8-96 19:28	4,40	16				27,36	25,80	17,60	8,80
9-8-96 20:32	1,90	14				28,61	9,60	7,80	3,80
18-8-96 16:29	1,50	19				12,62	7,20	5,60	3,00
18-8-96 18:20	11,90	74	16,34	12,20	0,21	14,01	36,80	29,20	26,80
20-8-96 18:44	2,80	51				21,18	7,20	7,20	4,80
23-8-96 19:47	15,10	66	15,84	9,30	0,27	17,68	33,00	28,40	20,00
24-8-96 19:40	5,40	122				29,68	4,20	4,40	4,00
24-8-96 22:45	18,00	64	12,76	4,46	0,96	34,63	21,60	19,20	12,20
27-8-96 22:42	2,10	27				39,00	9,00	7,20	4,20
28-8-96 22:56	1,50	24				37,15	6,00	4,80	3,00
29-8-96 1:54	1,30	29				38,18	3,60	3,80	2,60
30-8-96 20:21	15,80	62	13,00	13,90	0,18	33,08	33,60	27,60	18,00
31-8-96 11:57	18,60	42	11,16	18,60	2,85	45,80	56,40	57,20	36,20
31-8-96 17:44	1,30	14				62,87	6,60	5,20	2,60
31-8-96 19:41	8,00	106	9,01	6,80	0,23	63,65	19,20	16,00	14,40
2-9-96 15:09	34,00	66	9,44	32,54	2,13	59,78	99,00	82,80	56,20
2-9-96 20:16	2,70	20				91,80	13,60	10,00	5,40
4-9-96 0:50	6,70	113				83,90	6,80	6,40	6,20
7-9-96 19:04	1,30	43				62,21	6,60	4,80	2,40
9-9-96 3:29	4,80	39				55,48	24,00	16,00	9,20
12-9-96 16:47	3,00	21				42,25	12,60	10,80	6,00
12-9-96 18:34	10,10	119	11,28	2,70	0,14	44,92	16,20	11,80	6,60
13-9-96 15:32	6,00	90				50,41	13,80	12,40	8,80
13-9-96 21:05	5,80	123				57,08	12,60	11,20	6,80
18-9-96 17:42	18,50	305	-	-	0,25	38,68	34,20	34,00	33,20
2-10-96 18:19	2,50	50				14,08	7,20	6,00	4,40
3-10-96 6:18	67,20	1985				15,76	8,40	6,60	6,00
4-10-96 19:06	1,40	19				71,16	6,00	5,20	2,80
4-10-96 23:47	4,80	121				71,16	7,20	6,80	5,20
5-10-96 3:02	3,20	203				74,74	2,40	2,00	1,60
15-10-96 20:44	1,00	56				26,64	4,20	3,20	1,60
27-11-96 15:36	1,50	42				0,38	3,60	2,80	2,20
28-11-96 0:17	1,60	76				1,82	1,80	2,00	1,60
28-11-96 3:08	5,20	132				3,38	4,80	4,40	3,80

**Annexe VIII.4. Données pluviométriques et hydrométriques collectées
sur le bassin versant de Pastelero (1996).**

DATE / HEURE CARBONERAS	PLUIE	DUREE	IL	PUIL	Lr	INDICE K1	INTENSITE DE PLUIE EN			
	mm	mn					10 mn	15 mn	30 mn	
	mm/h	mm				mm	mm/h	mm/h	mm/h	
22-05-96 14:47	4,4	43				0,00	12,00	9,60	7,40	
29-05-96 21:29	1,2	35				2,12	2,40	2,40	2,20	
01-06-96 18:59	2,5	33				2,49	9,60	8,00	4,80	
12-06-96 18:30	1,8	17				1,68	7,20	8,00	3,20	
13-06-96 20:28	4,6	20				2,92	25,20	18,00	9,20	
25-06-96 1:50	2,8	11				2,45	18,80	11,20	5,60	
25-06-96 14:07	4,6	50				4,99	11,40	10,40	7,60	
30-06-96 18:02	4,1	51				5,72	13,80	10,80	7,80	
30-06-96 21:02	1,5	51				9,70	4,20	3,20	1,80	
09-07-96 18:34	1,7	14				4,64	7,20	6,80	3,40	
10-07-96 17:53	3,7	15	18,37	0,00	0,06	5,70	19,20	14,80	7,40	
10-07-96 22:05	2	86				9,24	3,60	2,80	2,20	
11-07-96 19:14	20,7	107	16,88	15,40	1,42	10,29	46,80	46,00	32,60	
11-07-96 22:14	2	76				30,81	3,00	2,80	2,60	
12-07-96 17:16	3,5	11				30,12	21,00	14,00	7,00	
14-07-96 20:33	4,3	68				27,15	11,40	8,40	4,60	
14-07-96 22:45	5,8	80				31,17	7,80	7,20	5,40	
16-07-96 1:57	1,2	7				33,01	7,20	4,80	2,40	
25-07-96 2:59	1,6	1				13,85	9,60	6,40	3,20	
02-08-96 21:57	1,8	30				6,41	8,00	4,80	3,60	
05-08-96 23:43	4,7	86				6,04	7,80	7,60	5,60	
07-08-96 20:08	19,4	43	17,31	17,70	1,77	8,93	50,40	47,20	36,00	
07-08-96 22:25	4,1	143				28,06	7,80	7,20	5,40	
10-08-96 19:50	1,9	20				24,08	8,40	6,80	3,80	
13-08-96 17:27	2,6	17				19,44	13,80	10,00	5,20	
13-08-96 20:02	18,9	113	13,64	14,29	0,00	21,80	85,20	58,40	4,00	
14-08-96 20:06	13,1	89	10,34	8,31	1,46	36,82	10,80	7,20	30,00	
18-08-96 15:17	2,3	26				27,30	10,20	6,00	4,60	
18-08-96 19:19	1,7	26				29,11	7,20	5,60	3,40	
20-08-96 18:23	14,1	49	12,78	12,40	0,15	25,32	46,60	37,80	26,60	
21-08-96 17:52	2,8	26				35,75	10,80	8,40	5,60	
23-08-96 19:27	13,8	91	11,43	8,84	0,17	31,35	23,40	21,20	19,40	
24-08-96 4:47	1	19				43,43	4,80	3,60	2,00	
24-08-96 19:41	15,6	235	9,43	7,40	0,22	41,76	30,00	25,20	15,20	
28-08-96 22:37	6,9	20				37,98	37,80	27,20	13,80	
30-08-96 19:00	25	-	10,24	7,90	0,93	37,30	-	-	-	
31-08-96 12:57	3,7	24				57,81	17,40	11,60	7,40	
31-08-96 17:31	4,1	53				60,35	10,80	9,60	6,40	
31-08-96 19:41	20,3	274	6,28	8,10	1,55	63,87	19,20	15,60	25,00	
02-09-96 14:50	25,2	117	5,56	23,30	3,09	70,32	46,80	42,00	32,20	
04-09-96 1:19	5,7	143				82,74	6,00	5,20	4,20	
07-09-96 18:49	2,6	11				60,91	15,00	10,40	5,20	
08-09-96 17:02	1,1	11				57,89	6,00	4,40	2,20	
12-09-96 17:39	8,1	108	9,84	5,00	0,00	39,44	24,00	17,60	9,60	
13-09-96 15:16	10	131	9,14	6,40	0,11	43,45	33,00	25,60	15,00	
13-09-96 20:46	7,2	124	7,77	0,79	0,04	62,24	11,40	10,00	7,60	
18-09-96 17:41	32,1	240	10,39	21,98	1,77	36,52	55,20	52,80	38,40	
25-09-96 22:41	1,4	56				33,37	4,20	3,80	2,20	
03-10-96 6:12	4,1	159				16,73	2,40	2,40	2,40	
03-10-96 14:05	25,8	791				20,18	7,20	6,40	4,80	
04-10-96 4:17	11,4	444				43,32	4,20	4,00	3,40	
04-10-96 15:04	3,8	251				62,32	3,60	3,20	2,00	
04-10-96 23:41	10	540				54,14	6,00	5,60	4,20	
27-11-96 13:55	3,5	13				0,30	19,80	14,00	7,00	
27-11-96 19:59	1,7	5				3,71	10,20	6,80	3,40	

**Annexe VIII.5. Données pluviométriques et hydrométriques collectées
sur le bassin versant de El Viejo (1996).**

DATE / HEURE CARBONERAS	PLUIE mm	DUREE mn	IL mm/h	PUIL mm	Lr mm	INDICE IK1 mm	INTENSITE DE PLUIE EN			
							10 mn mm/h	15 mn mm/h	30 mn mm/h	
21-05-96 14:31	1,50	23				0,00	7,20	5,20	3,00	
31-05-96 19:04	5,50	25				0,54	21,60	17,20	11,00	
12-06-96 15:56	6,00	26				1,84	27,60	19,60	12,00	
12-06-96 22:04	1,00	12				7,65	4,80	4,00	2,00	
15-06-96 15:39	9,00	68				6,58	21,00	17,20	12,20	
15-06-96 21:16	2,50	46				15,22	6,00	5,60	3,80	
16-06-96 22:58	11,50	152				15,92	7,20	6,80	6,20	
25-06-96 13:42	3,00	55				11,59	6,60	6,00	5,00	
25-06-96 18:33	3,50	101				14,29	7,20	6,40	4,20	
26-06-96 3:48	2,00	51				17,12	2,40	2,80	2,40	
26-06-96 20:27	1,50	67				17,84	1,80	1,60	1,40	
30-06-96 18:01	2,00	36				13,10	5,40	4,40	3,60	
30-06-96 20:19	5,00	84				14,95	10,80	8,40	5,20	
05-07-96 19:50	2,50	14				12,13	11,40	10,00	5,00	
06-07-96 21:32	1,00	5				13,15	6,00	4,00	2,00	
07-07-96 16:18	2,00	6				13,08	12,00	8,00	4,00	
09-07-96 16:37	2,00	8				12,33	12,00	8,00	4,00	
10-07-96 21:32	4,50	128				12,70	6,00	5,60	4,60	
11-07-96 0:58	1,00	58				16,96	1,20	1,20	1,00	
11-07-96 19:09	47,50	117	16,67	42,66	3,88	16,65	108,00	104,00	75,00	
11-07-96 22:41	2,00	59				63,21	3,00	2,80	2,40	
14-07-96 20:15	13,00	211				48,80	22,80	17,60	12,20	
23-07-96 20:08	1,00	50				25,14	1,20	1,20	1,20	
01-08-96 21:47	7,00	61				10,55	30,00	20,80	12,20	
05-08-96 0:29	1,00	16				12,86	3,60	3,60	2,00	
06-08-96 0:01	1,00	21				12,56	3,00	2,80	2,00	
07-08-96 20:19	23,00	40	17,64	19,50	1,48	11,28	90,00	72,00	43,40	
07-08-96 22:12	8,00	88				34,01	13,60	11,20	8,40	
13-08-96 18:40	27,50	162	13,52	19,50	0,29	23,35	68,00	49,60	29,20	
14-08-96 19:57	22,50	42	8,24	22,00	1,47	45,86	63,00	58,00	40,40	
18-08-96 23:45	1,00	15				45,10	4,20	4,00	2,00	
20-08-96 18:25	31,00	58	9,67	30,00	1,42	38,61	60,00	54,00	42,40	
23-08-96 19:03	16,50	128	7,29	14,00	0,13	51,41	27,00	24,60	18,00	
24-08-96 19:29	17,00	241	5,63	10,05	0,09	63,14	16,20	15,20	12,60	
26-08-96 17:47	1,00	10				54,10	6,00	4,00	2,00	
28-08-96 22:19	6,00	23				54,07	19,80	18,00	12,00	
29-08-96 0:48	1,00	8				59,45	8,00	4,00	2,00	
29-08-96 17:48	2,00	17				56,33	7,80	7,20	4,00	
30-08-96 20:03	8,00	138	7,16	2,92	0,01	52,28	15,00	12,80	9,20	
31-08-96 18:27	9,00	131	6,89	5,50	0,28	55,37	22,80	18,00	9,80	
31-08-96 20:57	18,50	239	5,63	10,74	0,36	63,17	10,80	9,60	7,80	
02-09-96 14:32	17,50	61	4,99	16,00	1,03	68,68	49,80	41,20	30,40	
03-09-96 16:21	9,00	98	4,14	7,50	0,12	77,12	21,80	16,40	8,80	
04-09-96 1:30	5,00	150				83,27	4,80	4,00	3,80	
07-09-96 14:03	4,50	24	5,76	4,50	0,07	62,00	11,40	11,20	9,00	
07-09-96 18:39	1,50	29				65,24	3,00	3,20	3,00	
12-09-96 17:41	9,00	100	9,24	5,50	0,02	40,64	20,40	14,80	8,80	
13-09-96 15:25	1,50	7				45,34	9,00	6,00	3,00	
13-09-96 20:10	12,50	94	8,25	9,00	0,15	45,83	16,00	16,00	11,20	
18-09-96 17:40	15,00	186	10,30	7,63	0,12	35,73	25,80	21,20	13,60	
20-09-96 16:37	1,00	40				41,83	1,80	1,60	1,60	
25-09-96 22:50	14,50	33	12,94	13,50	0,13	25,37	36,00	36,00	28,00	
03-10-96 4:33	14,00	201				19,29	12,60	11,20	9,10	
03-10-96 16:47	82,25	1561				31,63	16,90	18,20	15,40	
04-10-96 23:44	7,00	101				100,11	10,50	9,80	7,70	
27-11-96 17:55	1,50	40				0,50	4,20	3,20	2,60	
28-11-96 0:44	3,50	96				1,94	3,60	3,20	3,00	
28-11-96 4:01	8,50	133				5,37	9,00	7,80	6,80	

ANNEXES DU CHAPITRE 9

Caractéristiques des parcelles :	: IX.1.
Matrice de corrélation des parcelles	: IX.2.
Caractéristiques des bassins versants	: IX.3.
Matrice de corrélation des bassins versants	: IX.4.

Annexe IX.1. Caractéristiques physiographiques et phytoécologiques des parcelles.

PARCELLES		Piémont de Versant				Haut Glacis				
		CARBONERAS		VIEJO		CARBONERAS		VIEJO		
Caractéristiques du milieu	Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	
Superficie (m²)		61	62	65	65	59	62	53	68	
Pente (%)	PENTE	15	18	17	18	9	8	11	11	
Epaisseur du sol (cm)	E_SOL	25	25	100	50	70	50	100	100	
Pierrosité de surface										
	< 2 cm (%)	P_INF2	31	21	40	13	16	55	11	19
	> 2 cm (%)	P_SUP2	24	29	30	7	2	2	12	26
	Somme des pierrosités (%)	SOM_P	55	50	70	20	19	57	23	45
Couverture végétale au niveau du sol (%)	C_VEG	40	40	28	80	62	34	74	52	
Sol nu (%)	S_NU	5	10	2	0	19	9	3	3	
Type de couverture végétale *	T_COUV	2	1	2	3	2	1	2	3	
Type de couverture végétale		1	Pâturage							
		2	Pâturage + arbustes							
		3	Pâturage + arbustes + arbres							
Horizon Superficiel du sol (0-10 cm).										
Refus à 2 mm (%)	REFUS	49	41	40	49	48	43	59	38	
Sable (%)	SABLE	71	77	59	63	73	61	69	75	
Limon (%)	LIMON	18	12	14	12	14	20	12	6	
Argile (%)	ARGILE	11	11	27	25	11	19	19	19	
Carbone total (%)	CARBO	3,8	3,4	3,3	3,6	2,6	1,7	2,0	2,2	
CaCO3 tot. (%)	CACO3	1,0	1,0	0,0	0,0	7,4	14,8	0,0	0,0	
p.H.	PH	8,0	8,0	6,4	5,9	8,2	8,3	6,9	6,6	
Stabilité structurale	INEST	0,36	0,34	0,45	0,52	0,38	0,93	1,42	1,42	
Erosion annuelle (t / ha)	ERO	1,8	5,2	10,0	5,7	6,7	4,1	11,0	16,0	
Caractéristiques Hydrologiques										
Coefficient d'écoulement annuel	COEF	0,13	0,094	0,149	0,056	0,193	0,25	0,208	0,134	
B	B_40	5	4	3,5	6	2	2	4,5	5	
IL (IK = 0)	IL_IK_0	26,2	26,2	37,4	39,1	26,2	26,2	31,9	37,4	
IL (IK = 80)	IL_IK_80	5,8	5,8	7,6	8,3	5,8	5,8	8,1	7,6	
Coefficient maximum de ruissellement	C_MAX	0,36	0,27	0,36	0,14	0,51	0,63	0,52	0,37	
BETA	BETA	-0,019	-0,019	-0,020	-0,019	-0,019	-0,019	-0,017	-0,020	
Pente de l'écoulement (Lr / (PUIL-B))	P_ECOU	0,15	0,11	0,36	0,13	0,17	0,19	0,50	0,36	

Annexe IX.2. Matrice de corrélation des variables descriptives des parcelles.

Variable	PENTE	E_SOL	P_INF2	P_SUP2	SOM_P	C_VEG	S_NU	T_COUV	REFUS	SABLE	LIMON	ARGILE	ARG_LIM	CARBO	CACO3	PH	INEST	ERO	COEF	B_40	IL_IK_0	IL_IK_80	P_ECOU	BETA
PENTE	1,00	-0,32	-0,19	0,59	0,21	-0,06	-0,48	0,14	-0,16	-0,06	-0,17	0,23	0,11	0,87	-0,88	-0,45	-0,54	-0,20	-0,87	0,80	0,38	0,25	-0,86	-0,32
E_SOL	-0,32	1,00	-0,16	0,05	-0,10	0,18	-0,26	0,44	0,04	-0,20	-0,51	0,55	0,19	-0,51	-0,22	-0,54	0,64	0,88	0,09	-0,05	0,60	0,65	0,18	-0,06
P_INF2	-0,19	-0,16	1,00	0,01	0,79	-0,81	0,03	-0,54	-0,45	-0,57	0,70	0,17	0,57	-0,18	0,63	0,36	-0,14	-0,33	0,50	-0,52	-0,26	-0,43	0,51	-0,26
P_SUP2	0,59	0,05	0,01	1,00	0,62	-0,50	-0,39	0,03	-0,47	0,27	-0,36	0,01	-0,21	0,46	-0,87	-0,22	-0,10	0,27	-0,51	0,39	0,22	0,08	-0,42	-0,37
SOM_P	0,21	-0,10	0,79	0,62	1,00	-0,95	-0,20	-0,41	-0,85	-0,27	0,32	0,13	0,31	0,14	0,09	0,16	-0,18	-0,09	0,09	-0,16	-0,08	-0,29	0,15	-0,44
C_VEG	-0,06	0,18	-0,81	-0,50	-0,95	1,00	-0,12	0,57	0,87	0,15	-0,41	0,10	-0,17	-0,08	-0,28	-0,42	0,29	0,19	-0,27	0,43	0,32	0,54	-0,30	0,38
S_NU	-0,48	-0,26	0,03	-0,39	-0,20	-0,12	1,00	-0,49	-0,05	0,41	0,27	-0,71	-0,48	-0,21	0,58	0,79	-0,34	-0,30	0,57	-0,77	-0,75	-0,76	0,45	0,19
T_COUV	0,14	0,44	-0,54	0,03	-0,41	0,57	-0,49	1,00	0,08	0,00	-0,62	0,42	0,00	0,17	-0,56	-0,76	0,27	0,52	-0,57	0,66	0,78	0,71	-0,49	-0,37
REFUS	-0,16	0,04	-0,45	-0,47	-0,65	0,67	-0,05	0,08	1,00	-0,03	0,18	-0,10	0,01	-0,09	-0,11	-0,02	0,18	-0,19	0,13	0,18	-0,14	0,24	0,16	0,84
SABLE	-0,06	-0,20	-0,57	0,27	-0,27	0,15	0,41	0,00	-0,03	1,00	-0,47	-0,78	-1,00	0,04	-0,26	0,35	0,06	0,14	-0,10	0,13	-0,37	-0,33	-0,12	0,18
LIMON	-0,17	-0,51	0,70	-0,36	0,32	-0,41	0,27	-0,62	0,18	-0,47	1,00	-0,18	0,45	0,05	0,84	0,59	-0,43	-0,81	0,55	-0,49	-0,81	-0,58	0,52	0,24
ARGILE	0,23	0,55	0,17	0,01	0,13	0,10	-0,71	0,42	-0,10	-0,78	-0,18	1,00	0,80	-0,06	-0,19	-0,82	0,26	0,40	-0,30	0,25	0,84	0,79	-0,25	-0,37
ARG_LIM	0,11	0,19	0,57	-0,21	0,31	-0,17	-0,48	0,00	0,01	-1,00	0,45	0,80	1,00	-0,03	0,22	-0,38	-0,03	-0,13	0,06	-0,07	0,39	0,36	0,09	-0,18
CARBO	0,87	-0,51	-0,18	0,46	0,14	-0,08	-0,21	0,17	-0,09	0,04	0,05	-0,06	-0,03	1,00	-0,56	-0,19	-0,77	-0,44	-0,73	0,49	0,11	-0,03	-0,74	-0,34
CACO3	-0,88	-0,22	0,63	-0,67	0,09	-0,28	0,58	-0,56	-0,11	-0,26	0,64	-0,19	0,22	-0,56	1,00	0,65	-0,02	-0,38	0,82	-0,80	-0,56	-0,59	0,74	0,11
PH	-0,45	-0,54	0,36	-0,22	0,16	-0,42	0,79	-0,76	-0,02	0,35	0,59	-0,82	-0,38	-0,19	0,65	1,00	-0,28	-0,56	0,69	-0,67	-0,98	-0,95	0,62	0,34
INEST	-0,54	0,64	-0,14	-0,10	-0,18	0,29	-0,34	0,27	0,18	0,06	-0,43	0,26	-0,03	-0,77	-0,02	-0,28	1,00	0,71	0,25	-0,13	0,31	0,48	0,33	0,28
ERO	-0,20	0,88	-0,33	0,27	-0,09	0,19	-0,30	0,52	-0,19	0,14	-0,81	0,40	-0,13	-0,44	-0,38	-0,56	0,71	1,00	-0,13	0,18	0,63	0,63	-0,05	-0,20
COEF	-0,87	0,09	0,50	-0,51	0,09	-0,27	0,57	-0,57	0,13	-0,10	0,55	-0,30	0,06	-0,73	0,82	0,69	0,25	-0,13	1,00	-0,82	-0,63	-0,52	0,98	0,42
B_40	0,60	-0,05	-0,52	0,39	-0,18	0,43	-0,77	0,66	0,18	0,13	-0,49	0,25	-0,07	0,49	-0,80	-0,67	0,15	0,18	-0,82	1,00	0,58	0,61	-0,75	-0,11
IL_IK_0	0,36	0,80	-0,26	0,22	-0,08	0,32	-0,75	0,78	-0,14	-0,37	-0,81	0,84	0,39	0,11	-0,56	-0,98	0,31	0,63	-0,63	0,58	1,00	0,91	-0,56	-0,49
IL_IK_80	0,25	0,65	-0,43	0,08	-0,29	0,54	-0,76	0,71	0,24	-0,33	-0,58	0,79	0,36	-0,03	-0,59	-0,95	0,48	0,63	-0,52	0,61	0,91	1,00	-0,44	-0,08
P_ECOU	-0,86	0,18	0,51	-0,42	0,15	-0,30	0,45	-0,49	0,18	-0,12	0,52	-0,25	0,09	-0,74	0,74	0,62	0,33	-0,05	0,98	-0,75	-0,56	-0,44	1,00	0,42
BETA	-0,32	-0,06	-0,26	-0,37	-0,44	0,38	0,19	-0,37	0,84	0,18	0,24	-0,37	-0,18	-0,34	0,11	0,34	0,28	-0,20	0,42	-0,11	-0,49	-0,08	0,42	1,00

Annexe IX.3. Caractéristiques physiographiques et phytoécologiques des bassins versants.

DESCRIPTION DES VARIABLES		BASSINS VERSANTS						
		EL VIEJO	OSO NEGRO	EL MUERTO	MOLINO	CARBONERAS	PASTELERO	EL TULLIDO
C_ANNU	Coefficient de ruissellement annuel	0,021	0,000	0,035	0,000	0,034	0,027	0,023
C_SAISON	Coefficient de ruissellement saisonnier (juin à octobre)	0,036	0,000	0,077	0,000	0,047	0,052	0,054
C_MAX	Coefficient de ruissellement maximum observé	0,08	0,00	0,18	0,00	0,16	0,12	0,14
IL_IK_0	Intensité limite pour IK = 0 (mm/h)	22,6	60,0	28,1	60,0	30,0	20,4	19,3
IL_IK_80	Intensité limite pour IK = 80 (mm/h)	3,89	20,00	5,24	25,00	5,04	4,60	7,40
BETA	Valeur beta (mm ⁻¹)	-0,02	-0,100	-0,02	-0,100	-0,02	-0,02	-0,01
RY_DA_TO	Rhyolite, dacite et toba (%)	100,0	0,0	0,0	0,0	53,0	0,0	57,4
BS	Basalte (%)	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0
CGBA	Conglomérat basaltique (%)	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0
CAL	Calcaire (%)	0,0	0,0	60,0	0,0	28,4	15,3	0,0
COL_ALU	Colluvions et alluvions (%)	0,0	0,0	40,0	0,0	18,6	68,0	42,6
PE_SU_20	Pente supérieure à 20% (%)	100,00	0,00	72,60	0,00	65,00	23,00	5,00
PE_10_20	Pente entre 10 et 20 % (%)	0,00	100,00	0,00	72,82	0,00	0,00	3,00
PE_5_15	Pente entre 5 et 15 % (%)	0,00	0,00	27,40	27,18	11,00	67,00	86,20
PE_3_5	Pente entre 3 et 5 % (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	24,00	10,00	5,80
CROUTE	Recouvrement du bassin par une croûte calcaire (%)	0	36,8	54,2	13,8	38,5	94,1	68,9
S_CROUTE	Recouvrement du bassin sans croûte calcaire (%)	100	64,4	45,8	86,4	60,5	5,9	31,1
PF_SQ	Sols squelettiques (%)	5,7	48,0	19,9	0,0	8,8	14,7	9,6
PF_30	Profondeur inférieure à 30 cm (%)	13,5	21,2	54,2	13,6	17,0	58,0	31,9
PF_50	Profondeur entre 30 et 50 cm (%)	0,0	14,9	0,0	0,0	13,7	15,8	22,6
PF_SUP50	Profondeur supérieure à 50 cm (%)	80,8	15,9	25,9	86,4	60,5	11,5	35,9
ROCHE	Roche	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7
TX_SL_LS	Texture sablo-limoneuse et limono-sableuse	100,0	0,0	32,2	0,0	9,6	74,3	85,4
TX_LSA_EQ	Texture limono-sablo-argileuse et équilibrée	0,0	73,1	41,9	59,8	90,4	25,7	5,9
TX_LA_A	Texture limono-argileuse et argileuse	0,0	21,2	25,9	40,2	0,0	0,0	0,0
PIE_1	Pierrosité faible, entre 0 et 25 % du volume du sol (%)	15,5	22,4	25,9	0,0	36,0	10,8	26,5
PIE_2	Pierrosité moyenne, entre 25 et 50 % du volume du sol (%)	14,7	71,9	61,8	26,6	64,0	89,2	64,8
PIE_3	Pierrosité forte, plus de 50 % du volume du sol (%)	69,8	5,7	12,3	73,4	0,0	0,0	8,7
HERB	Végétation herbacée (%)	16,2	0,0	57,5	0,0	66,7	23,5	53,5
SUCUL	Végétation xérophile à plantes grasses (%)	54,4	91,7	21,7	90,7	11,6	0,0	2,6
MAT_ARB	Végétation arborescente bulsonnante et arborée (%)	29,4	8,3	20,8	9,3	21,7	76,5	43,9
CO_75_100	Taux de couverture au sol entre 75 et 100% (%)	27,2	25,0	48,0	37,0	34,9	23,1	19,4
CO_50_75	Taux de couverture au sol entre 50 et 75% (%)	41,3	66,7	31,2	53,7	62,2	68,2	57,1
CO_IN_50	Taux de couverture au sol inférieure à 50% (%)	31,5	8,3	20,8	9,3	2,9	8,7	23,5

Annexe IX.4. Matrice de corrélation des variables descriptives des bassins versants.

VARIABLES	C_ANNU	C_SAISON	C_MAX	IL_K_0	IL_K_80	BETA	RY_DA_TO	BS	COBA	CAL	COL_ALU	PE_SU_20	PE_10_20	PE_5_15	PE_3_5	CROUTE	S_CROUTE
C_ANNU	1,00	0,99	0,94	-0,86	-0,87	0,86	0,12	-0,58	-0,53	0,71	0,78	0,51	-0,88	0,44	0,26	0,59	-0,59
C_SAISON	0,99	1,00	0,97	-0,86	-0,87	0,87	0,17	-0,58	-0,56	0,72	0,73	0,52	-0,89	0,43	0,29	0,56	-0,55
C_MAX	0,94	0,97	1,00	-0,83	-0,86	0,87	0,21	-0,58	-0,56	0,71	0,68	0,49	-0,88	0,40	0,49	0,54	-0,54
IL_K_0	-0,86	-0,86	-0,83	1,00	0,95	-0,95	-0,52	0,63	0,58	-0,29	-0,67	-0,53	0,96	-0,49	-0,34	-0,46	0,46
IL_K_80	-0,87	-0,87	-0,86	0,95	1,00	-0,98	-0,51	0,76	0,46	-0,45	-0,57	-0,69	0,93	-0,23	-0,42	-0,38	0,38
BETA	0,86	0,87	0,87	-0,95	-0,98	1,00	0,50	-0,82	-0,38	0,40	0,60	0,58	-0,89	0,33	0,41	0,46	-0,46
RY_DA_TO	0,12	0,17	0,21	-0,52	-0,51	0,50	1,00	-0,33	-0,39	-0,29	-0,26	0,58	-0,50	-0,13	0,19	-0,40	0,40
BS	-0,58	-0,58	-0,58	0,63	0,76	-0,82	-0,33	1,00	-0,20	-0,29	-0,40	-0,41	0,49	-0,05	-0,28	-0,41	0,41
COBA	-0,53	-0,56	-0,56	0,58	0,46	-0,38	-0,39	-0,20	1,00	-0,29	-0,28	-0,44	0,74	-0,34	-0,25	0,00	0,00
CAL	0,71	0,72	0,71	-0,29	-0,45	0,40	-0,29	-0,29	-0,29	1,00	0,40	0,47	-0,45	-0,06	0,20	0,29	-0,29
COL_ALU	0,78	0,73	0,68	-0,67	-0,57	0,60	-0,26	-0,40	-0,28	0,40	1,00	-0,08	-0,60	0,79	0,29	0,94	-0,94
PE_SU_20	0,51	0,52	0,49	-0,53	-0,69	0,58	0,58	-0,41	-0,44	0,47	-0,08	1,00	-0,64	-0,44	0,14	-0,33	0,33
PE_10_20	-0,88	-0,89	-0,88	0,96	0,93	-0,89	-0,50	0,49	0,74	-0,45	-0,60	-0,64	1,00	-0,38	-0,43	-0,36	0,36
PE_5_15	0,44	0,43	0,40	-0,49	-0,23	0,33	-0,13	-0,05	-0,34	-0,06	0,79	-0,44	-0,38	1,00	0,11	0,77	-0,77
PE_3_5	0,26	0,29	0,49	-0,34	-0,42	0,41	0,19	-0,28	-0,25	0,20	0,29	0,14	-0,43	0,11	1,00	0,32	-0,32
CROUTE	0,59	0,55	0,54	-0,46	-0,38	0,46	-0,40	-0,41	0,00	0,29	0,94	-0,33	-0,36	0,77	0,32	1,00	-1,00
S_CROUTE	-0,59	-0,55	-0,54	0,46	0,38	-0,46	0,40	0,41	0,00	-0,29	-0,94	0,33	0,36	-0,77	-0,32	-1,00	1,00
PF_SQ	-0,21	-0,23	-0,25	0,38	0,23	-0,14	-0,42	-0,43	0,93	0,04	-0,08	-0,28	0,53	-0,28	-0,23	0,17	-0,17
PF_30	0,78	0,69	0,57	-0,47	-0,45	0,46	-0,48	-0,38	-0,09	0,59	0,89	-0,01	-0,42	0,56	-0,02	0,84	-0,84
PF_50	0,07	0,09	0,19	-0,23	-0,15	0,31	0,00	-0,45	0,30	-0,28	0,45	-0,51	-0,05	0,57	0,47	0,66	-0,66
PF_SUP50	-0,38	-0,33	-0,28	0,17	0,21	-0,31	0,51	0,59	-0,51	-0,30	-0,65	0,31	0,00	-0,38	-0,02	-0,80	0,80
ROCHE	-0,19	-0,12	-0,11	0,04	0,17	0,04	0,08	-0,25	0,41	-0,43	0,04	-0,67	0,25	0,41	-0,16	0,25	-0,25
TX_SL_LS	0,51	0,48	0,37	-0,81	-0,67	0,68	0,61	-0,44	-0,40	-0,19	0,42	0,35	-0,87	0,46	-0,11	0,22	-0,22
TX_LSA_E	-0,40	-0,37	-0,20	0,63	0,44	-0,46	-0,46	0,23	0,37	0,23	-0,33	-0,21	0,49	-0,48	0,42	-0,14	0,14
TX_LLA_A	-0,47	-0,46	-0,52	0,79	0,79	-0,82	-0,65	0,74	0,18	0,12	-0,40	-0,35	0,67	-0,28	-0,58	-0,35	0,35
PIE_1	0,41	0,50	0,63	-0,37	-0,53	0,62	0,30	-0,73	0,05	0,44	0,13	0,33	-0,37	-0,07	0,54	0,21	-0,21
PIE_2	0,37	0,33	0,37	-0,19	-0,22	0,31	-0,51	-0,50	0,36	0,30	0,71	-0,38	-0,08	0,46	0,40	0,89	-0,89
PIE_3	-0,44	-0,45	-0,53	0,28	0,37	-0,48	0,30	0,66	-0,31	-0,40	-0,62	0,18	0,20	-0,34	-0,52	-0,79	0,79
HERBE	0,75	0,83	0,93	-0,66	-0,70	0,74	0,25	-0,49	-0,52	0,85	0,46	0,39	-0,74	0,30	0,61	0,40	-0,40
SUCUL	-0,87	-0,88	-0,91	0,89	0,84	-0,87	-0,21	0,57	0,52	-0,44	-0,84	-0,26	0,87	-0,84	-0,58	-0,73	0,73
MAT_ARB	0,59	0,50	0,44	-0,72	-0,59	0,59	0,05	-0,38	-0,26	-0,02	0,85	-0,02	-0,60	0,71	0,27	0,75	-0,75
CO75_100	0,21	0,24	0,24	0,19	0,05	-0,15	-0,32	0,28	-0,31	0,77	-0,14	0,40	-0,05	-0,39	-0,07	-0,26	0,26
CO_50_75	-0,40	-0,43	-0,31	0,22	0,26	-0,20	-0,22	-0,02	0,48	-0,51	0,13	-0,84	0,34	0,22	0,47	0,37	-0,37
CO5U_50	0,32	0,34	0,19	-0,48	-0,39	0,40	0,60	-0,24	-0,34	-0,07	-0,04	0,47	-0,40	0,09	-0,55	-0,24	0,24

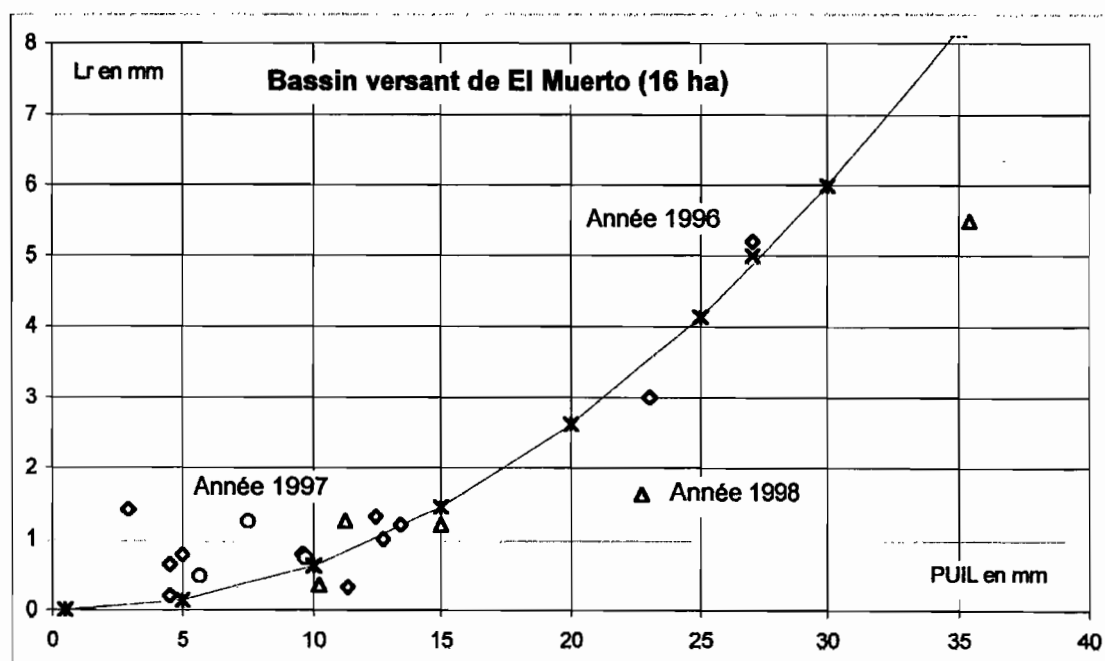
	PF_SQ	PF_30	PF_50	PF_SUP50	ROCHE	TX_SL_LS	TX_LSA_E	TX_LLA_A	PIE_1	PIE_2	PIE_3	HERBE	SUCUL	MAT_ARB	CO75_100	CO_50_75	CO5U_50
C_ANNU	-0,21	0,78	0,07	-0,38	-0,19	0,51	-0,40	-0,47	0,41	0,37	-0,44	0,75	-0,87	0,59	0,21	-0,40	0,32
C_SAISON	-0,23	0,69	0,09	-0,33	-0,12	0,48	-0,37	-0,46	0,50	0,33	-0,45	0,83	-0,88	0,50	0,24	-0,43	0,34
C_MAX	-0,25	0,57	0,19	-0,28	-0,11	0,37	-0,20	-0,52	0,63	0,37	-0,53	0,93	-0,91	0,44	0,24	-0,31	0,19
IL_K_0	0,38	-0,47	-0,23	0,17	0,04	-0,81	0,63	0,79	-0,37	-0,19	0,28	-0,66	0,89	-0,72	0,19	0,22	-0,48
IL_K_80	0,23	-0,45	-0,15	0,21	0,17	-0,67	0,44	0,79	-0,53	-0,22	0,37	-0,70	0,84	-0,59	0,05	0,26	-0,39
C	-0,14	0,46	0,31	-0,31	0,04	0,68	-0,46	-0,82	0,62	0,31	-0,48	0,74	-0,87	0,59	-0,15	-0,20	0,40
RY_DA_TO	-0,42	-0,48	0,00	0,51	0,08	0,81	-0,46	-0,85	0,30	-0,51	0,30	0,25	-0,21	0,05	-0,32	-0,22	0,60
BS	-0,43	-0,38	-0,45	0,59	-0,25	-0,44	0,23	0,74	-0,73	-0,50	0,66	-0,49	0,57	-0,38	0,28	-0,02	-0,24
COBA	0,89	-0,09	0,30	-0,51	0,41	-0,40	0,37	0,18	0,05	0,36	-0,31	-0,52	0,52	-0,26	-0,31	0,48	-0,34
CAL	0,04	0,59	-0,28	-0,30	-0,43	-0,19	0,23	0,12	0,44	0,30	-0,40	0,85	-0,44	-0,02	0,77	-0,51	-0,07
COL_ALU	-0,08	0,89	0,45	-0,85	0,04	0,42	-0,33	-0,40	0,13	0,71	-0,62	0,48	-0,84	0,85	-0,14	0,13	-0,04
PE_SU_20	-0,28	-0,01	-0,51	0,31	-0,57	0,35	-0,21	-0,35	0,33	-0,38	0,18	0,39	-0,26	-0,02	0,40	-0,94	0,47
PE_10_20	0,53	-0,42	-0,05	0,00	0,25	-0,67	0,49	0,67	-0,37	-0,08	0,20	-0,74	0,87	-0,60	-0,05	0,34	-0,40
PE_5_15	-0,28	0,56	0,57	-0,38	0,41	0,46	-0,48	-0,28	-0,07	0,46	-0,34	0,30	-0,64	0,71	-0,39	0,22	0,09
PE_3_5	-0,23	-0,02	0,47	-0,02	-0,16	-0,11	0,42	-0,56	0,54	0,40	-0,52	0,61	-0,58	0,27	-0,07	0,47	-0,55
CROUTE	0,17	0,84	0,66	-0,80	0,25	0,22	-0,14	-0,35	0,21	0,89	-0,79	0,40	-0,73	0,75	-0,26	0,37	-0,24
S_CROUTE	-0,17	-0,84	-0,66	0,80	-0,25	-0,22	0,14	0,35	-0,21	-0,89	0,79	-0,40	0,73	-0,75	0,26	-0,37	0,24
PF_SQ	1,00	0,16	0,30	-0,70	0,40	-0,34	0,33	0,13	0,28	0,51	-0,51	-0,24	0,29	-0,21	-0,14	0,28	-0,23
PF_30	0,16	1,00	0,17	-0,79	-0,08	0,26	-0,27	-0,11	0,05	0,67	-0,58	0,33	-0,61	0,65	0,12	-0,10	0,01
PF_50	0,30	0,17	1,00	-0,56	0,71	0,15	0,01	-0,56	0,43	0,72	-0,73	0,26	-0,46	0,46	-0,72	0,74	-0,30
PF_SUP50	-0,70	-0,75	-0,56	1,00	-0,37	-0,03	-0,01	0,17	-0,31	-0,80	0,83	-0,16	0,37	-0,43	0,22	-0,31	0,20
ROCHE	0,40	-0,08	0,71	-0,37	1,00	0,13	-0,19	-0,16	0,30	0,29	-0,34	0,03	-0,02	0,00	-0,61	0,32	0,16
TX_SL_LS	-0,34	0,26	0,15	-0,03	0,13	1,00	-0,83	-0,89	-0,04	-0,10	0,10	0,15	-0,51	0,69	-0,50	-0,20	0,75
TX_LSA_E	0,33	-0,27	0,01	-0,01	-0,19	-0,83	1,00	0,39	0,25	0,23	-0,27	0,02	0,31	-0,55	0,40	0,35	-0,85
TX_LLA_A	0,13	-0,11	-0,56	0,17	-0,16	-0,89	0,39	1,00	-0,48	-0,27	0,39	-0,44	0,89	-0,65	0,59	-0,27	-0,21
PIE_1	0,28	0,05	0,43	-0,31	0,30	-0,04	0,25	-0,48	1,00	0,39	-0,68	0,78	-0,49	-0,09	0,06	-0,02	-0,03
PIE_2	0,51	0,67	0,72	-0,80	0,29	-0,10	0,23	-0,27	0,39	1,00	-0,94	0,32	-0,52	0,49	-0,23	0,54	-0,50
PIE_3	-0,51	-0,56	-0,73	0,83	-0,34	0,10	-0,27	0,39	-0,88	-0,94	1,00	-0,54	0,59	-0,36	0,16	-0,43	0,41
HERBE	0,24	0,33	0,26	-0,16	0,03	0,15	0,02	-0,44	0,78	0,32	-0,54	1,00	-0,81	0,19	0,27	-0,24	0,06
SUCUL	-0,29	-0,61	-0,46	0,37	-0,02	-0,51	0,31	0,89	-0,49	-0,52	0,59	-0,81	1,00	-0,73	0,11	-0,01	-0,09
MAT_ARB	-0,21	0,65	0,46	-0,43	0,00	0,89	-0,55	-0,85	-0,09	0,49	-0,36	0,19	-0,73	1,00	-0,50	0,30	0,09
CO75_100	-0,14	0,12	-0,72	0,22	-0,61	-0,50	0,40	0,59	0,06	-0,23	0,16	0,27	0,11	-0,50	1,00	-0,86	-0,09
CO_50_75	0,28	-0,10	0,74	-0,31	0,32	-0,20	0,35	-0,27	-0,02	0,54	-0,43	-0,24	-0,01	0,30	-0,66	1,00	-0,69
CO5U_50	-0,23	0,01	-0,30	0,20	0,16	0,75	-0,85	-0,21	-0,03	-0,50	0,41	0,06	-0,09	0,09	-0,09	-0,69	1,00

ANNEXES DU CHAPITRE 10

Validation du modèle quadratique pour les bassins versants : X.1.1. à X.1.4.
Caractéristiques des bassins versants : X.2.1. à X.2.3.
Relation Intensité pluviométrique et la pluie journalière : X.3.1. à X.3.4.

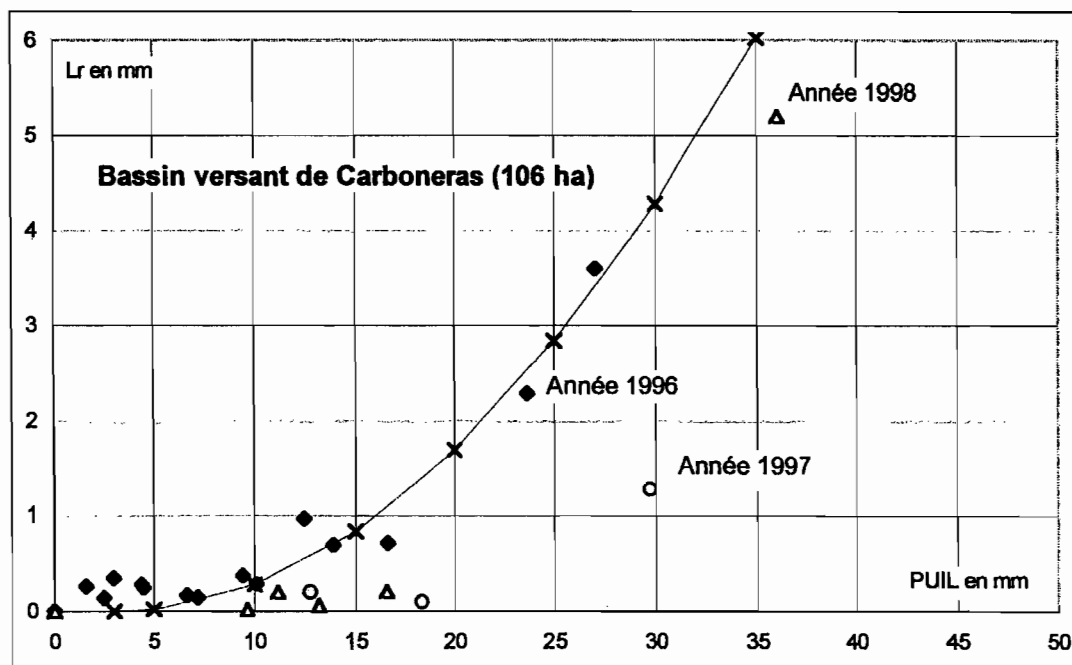
Annexe X.1.1. Validation du modèle quadratique pour le bassin El Muerto (15 ha).

Date	Pluie moyenne	Pluie utile PUIL	IL	IK	Imax en 30 mn	Lame ruisselée	Modèle quadratique	
	mm	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	F/E	E
							mm	mm ^{0,5}
07-08-96	28,5	27,0	25,0	5,8	54	5,20	2,21	0,092
13-08-96	24,6	12,7	17,3	24,4	28	1,00	1,28	0,088
14-08-96	12,8	4,5	11,7	43,7	14	0,64	0,32	0,191
18-08-96	15,0	11,3	13,1	38,2	19	0,32	0,59	0,053
23-08-96	15,4	9,6	13,8	35,6	23	0,79	0,72	0,100
24-08-96	16,0	5,0	11,0	47,1	13	0,78	0,15	0,182
27-08-96	5,0	4,5	11,2	46,2	10	0,20	0,19	0,104
30-08-96	16,2	12,4	12,6	40,2	17	1,31	0,49	0,096
31-08-96	20,2	2,9	9,9	52,1	10	1,41	0,00	0,409
02-09-96	25,8	23,1	8,4	60,3	33	3,00	0,00	0,075
18-09-96	25,6	13,4	15,3	30,4	27	1,20	0,98	0,088
19-07-97	17,2	5,7	22,9	10,2	34	0,48	1,99	0,187
10-10-97	17,0	9,7	23,6	8,8	21	0,73	2,06	0,112
11-10-97	12,0	7,6	17,6	23,3	16	1,24	1,34	0,178
08-08-98	38,0	22,8	17,4	23,8		1,63	1,31	0,059
17-08-98	47,0	11,2	17,0	25,2		1,25	1,24	0,112
02-09-98	47,5	35,4	15,9	28,5		5,49	1,08	0,068
14-10-98	18,5	10,2	24,2	7,5		0,35	2,13	0,073
26-10-98	17,7	15,0	21,2	14,0		1,20	1,80	0,083



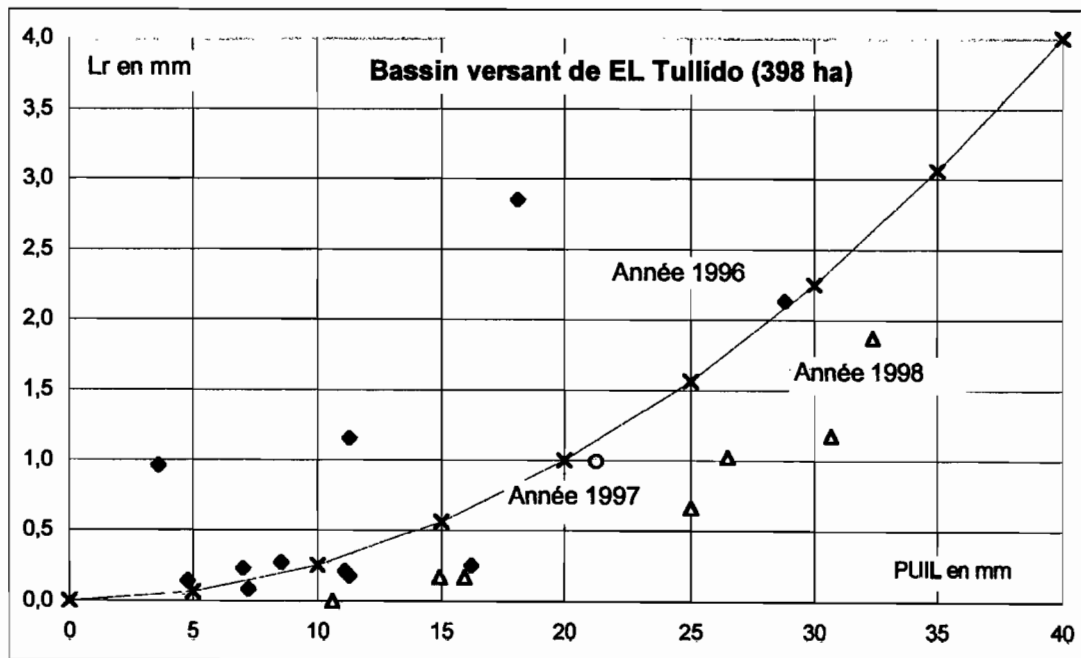
Annexe X.1.2. Validation du modèle quadratique pour le bassin versant Carboneras (106 ha).

Date	Pluie moyenne	Pluie utile PUIL	IL	IK	lmax en 30 mn	Lame ruisselée	Modèle quadratique	
	mm	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	F/E mm	E mm ^{0,5}
15-06-96	21,8	16,6	27	8,6	32	0,71	8,28	0,101
11-07-96	6,1	0,0	26	12,9	6,7	0,004	7,42	-
11-07-96	2,9	0,0	23	19,0	4,3	0,008	6,20	-
14-07-96	8,3	3,0	20	17,2	9	0,35	6,56	-
07-08-96	22,7	27,0	26	5,9	53	3,60	8,82	0,104
13-08-96	20,1	12,5	17	24,8	29	0,97	5,04	0,132
14-08-96	12,2	7,1	12	41,0	14	0,15	1,80	0,073
23-08-96	13,6	10,1	16	27,0	21	0,29	4,60	0,098
24-08-96	16,1	6,6	13	39,1	13	0,17	2,18	0,093
28-08-96	8,4	4,4	12	40,4	10	0,28	1,92	0,213
30-08-96	14,2	13,9	13	38,0	23	0,69	2,40	0,072
31-08-96	20,4	4,5	10	50,0	12	0,25	0,00	0,111
02-09-96	26,0	23,7	8	59,2	34	2,29	0,00	0,064
07-09-96	2,5	2,5	9	53,9	9	0,14	0,00	0,150
07-09-96	1,6	1,6	9	55,4	3	0,26	0,00	0,319
18-09-96	25,4	9,4	16	29,0	22	0,38	4,20	0,119
19-07-97	30,3	29,7	23	12,6	59	1,28	7,48	0,051
21-07-97	18,3	12,8	13	43,7	26	0,20	1,26	0,039
11-10-97	20,4	18,3	15	33,5	16	0,10	3,30	0,021
09-06-98	19,1	9,6	30	0,0		0,02	10,00	-
01-07-98	24,1	0,0	29	2,1		0,00	9,58	-
5/9-08-98	17,6	13,2	22	15,2		0,06	6,96	0,039
09-08-98	27,5	16,5	22	16,7		0,21	6,66	0,047
15/18-08-98	44,9	11,2	21	18,0		0,20	6,40	0,093
02-09-98	47,9	36,0	18	26,0		5,20	4,80	0,073



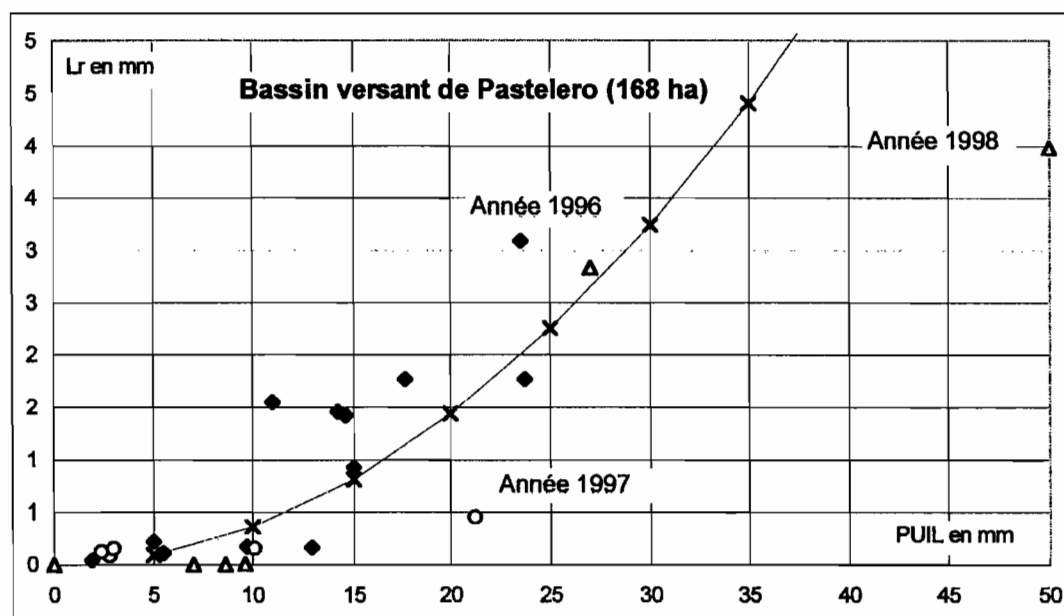
Annexe X.1.3. Validation du modèle quadratique pour le bassin versant El Tullido (398 ha).

Date	Pluie moyenne	Pluie utile PUIL	IL	IK	Imax en 30 mn	Lame ruisselée	Modèle quadratique F/E	E
	mm	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm	mm ^{0,5}
06-08-96	17,3	11,3	18,6	4	19	1,15	9,22	0,516
07-08-96	7,2	7,2	16,0	20	20	0,08	6,06	0,248
18-08-96	10,8	11,1	16,8	14	27	0,21	7,20	0,118
23-08-96	16,5	8,5	16,2	18	20	0,27	6,46	0,255
24-08-96	11,4	3,6	13,7	35	12	0,96	3,08	1,884
30-08-96	14,4	11,3	13,9	33	18	0,18	3,40	0,054
31-08-96	20,3	18,1	12,2	46	36	2,85	0,84	0,098
31-08-96	8,7	7,0	10,2	64	14	0,23	0,00	0,069
02-09-96	30,9	28,8	10,6	60	56	2,13	0,00	0,051
12-09-96	10,4	4,8	12,3	45	7	0,14	1,02	0,099
18-09-96	25,3	16,2	13,1	39	33	0,25	2,20	0,036
10-03-97	28,2	21,3	19,3	0	44	0,99	10,00	0,088
07-08-98	16,5	14,9	18,3	5		0,17	8,94	0,069
09-08-98	51,1	30,7	16,2	18		1,17	6,40	0,045
18-08-98	26,5	15,9	14,3	33		0,17	3,40	0,033
03-09-98	44,9	26,5	15,7	21		1,02	5,80	0,049
04-09-98	36,0	32,4	11,0	60		1,87	0,00	0,042
01-10-98	17,6	10,6	17,0	12		0,00	7,60	-
26-10-98	27,8	25,0	18,5	5		0,66	9,10	0,051



Annexe X.1.4. Validation du modèle quadratique pour le bassin Pastelero (168 ha).

Date	Pluie moyenne	Pluie utile PUIL	IL	IK	Imax en 30 mn	Lame ruisselée	Modèle quadratique	
	mm	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	F/E	E
							mm	mm ^{0.5}
11-07-96	20,7	14,6	17,0	10	33	1,42	8,00	0,181
07-08-96	19,4	17,7	17,0	9	36	1,77	8,20	0,140
13-08-96	18,9	14,2	13,0	22	30	1,46	5,60	0,141
20-08-96	14,1	12,9	12,4	25	27	0,16	5,00	0,051
23-08-96	13,8	9,7	11,0	31	19	0,17	3,80	0,070
24-08-96	15,6	5,0	8,8	42	15	0,22	1,60	0,138
30-08-96	25,0	15,0	9,7	37	38	0,93	2,60	0,078
31-08-96	20,3	11,0	5,7	64	12	1,55	0,00	0,113
02-09-96	25,2	23,5	5,0	70	32	3,09	0,00	0,075
13-09-96	10,0	5,5	8,6	43	15	0,11	1,40	0,081
13-09-96	7,2	1,9	7,2	52	7	0,04	0,00	0,105
18-09-96	32,1	23,7	9,7	37	34	1,77	2,60	0,063
19-07-97	24,8	10,1	16,3	11	19	0,15	7,80	0,168
19-07-97	8,6	2,8	9,9	36	9	0,08	2,80	-
21-07-97	23,6	21,2	6,4	58	34	0,45	0,00	0,032
22-07-97	2,4	2,4	7,1	53	20	0,12	0,00	0,144
23-09-97	5,5	3,0			6,2	0,15	10,00	-
24-07-98	11,6	7,0	18,0	6		0,00	8,80	-
09-08-98	10,7	9,6	15,0	15		0,01	7,00	0,030
15-08-98	82,7	50,0	16,0	14		3,98	7,20	0,047
18-08-98	5,2	0,0	5,0	72		0,00	0,00	-
27-08-98	9,7	0,0	10,0	36		0,00	2,80	-
02-09-98	30,0	27,0	9,4	39		2,83	2,20	0,068
01-10-98	14,3	8,6	18,0	6		0,00	8,80	-



Annexe X.2.1. Liste des presones du ranch Atotonilco.

Quartier Enclos	Nom du preson	Numéro d'ordre	Capacité m3	Longitude degré mn s	Latitude degré mn s	Altitude du presón m
Quartier Penasco						
Zapata	Zapata	1	6 500	103 42 14	24 38 43	1965
Aviacion	Tecolote	2	3 600	103 42 14	24 38 06	1995
	Aviacion	3	12 500	103 42 07	24 38 35	1972
C. Ancho	El Muerto	4	1 440	103 43 29	24 37 15	2075
	Carboneras	5	1 880	103 43 30	24 36 49	2072
El Pilon	Pastelero	6	10 880	103 40 59	24 36 57	2003
	Isiote haut versant	7	détruit	103 41 22	24 35 30	2023
	Isiote mi-versant	8	850	103 41 17	24 36 33	2018
	Isiote bas versant	9	3 400	103 41 02	24 36 41	2005
Marrufo	El Blanco	10	2 400	103 42 57	24 35 18	2148
	Temosachic	11	2 300	103 42 26	24 36 05	2155
	La Cuna	12	3 100	103 42 40	24 35 46	2120
Penasco	Penasco Grande	13	61 250	103 40 55	24 36 26	2008
San Miguel	El Viejo	14	6 880	103 41 43	24 34 26	2147
	Bordos Cuales 1 haut	15	2 300	103 41 01	24 33 32	2153
	Bordos Cuales 2 bas	16	2 500	103 40 57	24 33 43	2138
	Mono	17	3 100	103 41 24	24 33 53	2152
	Colorado	18	2 100	103 41 08	24 33 48	2158
	Las Tuzas 1 haut	19	détruit	103 40 16	24 34 16	2068
	Las Tuzas 2 bas	20	1 000	103 40 16	24 34 24	2064
La Carroza	Chapaderos	21	7 200	103 40 00	24 33 10	2051
	Limones	22	8 000	103 39 40	24 33 18	2080
Quartier Los Novios						
Novios	Borregas Haut (1)	23	600	103 45 39	24 36 07	2080
	Borregas bas (2)	24	2 200	103 45 55	24 36 02	2069
	Tres Bolas haut (1)	25	détruit	103 45 15	24 35 51	2135
	Tres Bolas bas (2)	26	2 300	103 45 24	24 35 51	2112
San Marcos	San Marcos	27	25 000	103 46 34	24 38 45	1992
Mezquite	El Tullido	28	4 720	103 45 10	24 38 52	1958
	El Mezquite	29	2 300	103 44 20	24 38 47	2001
Quartier San Marcos						
Xoconoxtle	El Tapado	30	10 000	103 46 57	24 38 12	2008
	Chihuahua	31	11 250	103 48 17	24 38 48	1984
	La Cueva	32	9 500	103 48 03	24 37 53	2017
Los Lobos	El Empachado haut	33	4 800	103 47 20	24 36 10	2076
	El Empachado bas	34	2 400	103 48 14	24 36 25	2098
Quartier Yerbanis						
Tepetate	Tepetate haut	35	2 400	103 49 46	24 40 34	1939
	Tepetate milieu	36	1 000	103 49 57	24 40 42	1937
	Tepetate bas	37	3 800	103 50 38	24 40 31	1925
	La Cueva	38	3 200	103 50 24	24 41 43	1920
Frances	Tepozan	39	détruit	103 49 32	24 41 36	1939
Chiquihuitillo	Los Corrales	40	12 500	103 47 50	24 43 56	1875
Quartier Gavilan						
Don Cruz	Nopal Tapon haut	41	1 300	103 45 08	24 45 20	
	Nopal Tapon bas	42	2 250	103 44 53	24 45 29	
Corrales	El Muerto	43	3 000	103 46 29	24 43 09	1892
	Corrales	44	9 600	103 46 30	24 43 37	1880
Coyotes	Oso Negro	45	1 140	103 42 20	24 43 08	1848

Annexe X.2.1. Suite.

Quartier Enclos	Nom du preson	Numéro d'ordre	Capacité m3	Longitude degré mn s	Latitude degré mn s	Altitude du presón m
Quartier Pajaritos						
Palo Blanco	El Ahogado	46	9 600	103 45 10	24 40 49	1935
	El Penitas	47	3 000	103 44 58	24 40 03	1949
Nana Prieta	La Capilla	48	42 500	103 44 13	24 40 31	1948
	Palo Blaco	49	550	103 44 01	24 40 23	1958
Guadalupe	El Huevo	50	4 600	103 42 14	24 40 13	1930
San Antonio	La Yerba	51	5 600	103 41 53	24 40 36	1903
Quartier Atotonilco						
Tepozan	Fuete	52	détruit	103 37 55	24 35 35	2098
Centinela	Coronela	53	7 600	103 40 07	24 35 20	2045
	Penasco Chico	54	4 300	10 40 20	24 35 47	2036
Penalito	El Gato	55	38 400	103 40 39	24 37 50	1968
La Escendida	Los Cuates	56	1 800	103 41 47	24 39 05	1941
Sauz Mocho	Gran Preson	57	20 500	103 41 56	24 39 29	1935
	Molino	58	730	103 41 34	24 39 05	1950
Quartier Indios						
La Campana	Sauz Mocho	59	57 750	103 38 56	24 39 22	1988
	Cerro de Enmedio	60	2 200	103 38 20	24 38 20	1998
Quartier Alacran						
La Zorra	La Zorra	61	2 700	103 35 28	24 40 56	2165

Annexe X.2.2 Caractéristiques topographiques des bassins versants.

Quartier Enclos	Nom du preson	S en km²	Altitudes en mètres				Pourcentages de S aux pentes			
			Max.	Méd.	Haut	Bas	< 5 %	5-10	10-20	> 20 %
Quartier Penasco										
Zapata	Zapata	3,65	2270	1995	2030	1985	80	15	3	2
Aviacion	Tecolote	3,03	2252	2040	2100	2030	45	15	15	25
	Aviacion aval Telocote	(1,47)	-	2000	-	-	80	0	15	5
C. Ancho	El Muerto	0,15	2262	2140	-	-	0	27	0	73
	Carboneras	1,06	2265	2120	2150	2100	24	11	0	65
El Pilon	Pastelero	1,68	2230	2050	2085	2025	10	67	0	23
	Islote haut versant	0,55	2120	2050	2070	2040	35	55	0	10
	Islote mi-versant	1,21	2200	2045	2075	2035	45	40	0	15
	Islote bas versant	(0,17)	-	2015	-	-	100	0	0	0
Marrufo	El Blanco	0,68	2315	2210	-	-	0	0	0	100
	Temosachic	0,52	2315	2200	-	-	0	0	0	100
	La Cuna	0,33	2300	2155	2200	2140	0	10	20	70
Penasco	Penasco Grande	19,7	-	-	-	-	-	-	-	-
San Miguel	El Viejo	1,78	2410	2210	2250	2180	0	0	0	100
	Bordos Cuates haut	0,26	2275	2185	-	-	0	0	0	100
	Bordos Cuates bas	(0,38)	-	2170	-	-	0	0	0	100
	Mono	0,53	2412	2215	2220	2200	0	0	0	100
	Colorado	0,19	2221	2185	-	-	0	0	0	100
La Carroza	Las Tuzas haut	0,85	2275	2095	2110	2080	35	40	20	5
	Las Tuzas bas	1,18	-	2090	-	-	50	40	5	5
	Chapaderos	1,9	2275	2090	2150	2080	0	50	15	35
	Limonas	0,18	2105	2090	-	-	20	80	0	0
Quartier Los Novios										
Novios	Borregas Haut	0,21	2172	2105	-	-	0	20	20	60
	Borregas bas	(0,64)	2380	2110	2140	2090	0	40	20	40
	Tres Bolas haut	0,4	2380	2225	-	-	0	0	0	100
	Tres Bolas bas	(0,19)	2372	2200	-	-	0	0	40	60
San Marcos	San Marcos	12,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Mezquite	El Tullido	3,98	2182	2000	2025	1985	6	88	3	5
	El Mezquite	3,27	2191	2045	2070	2030	30	40	20	15
Quartier San Marcos										
Xoconoxtle	El Tapado	2,02	2312	2055	2100	2035	20	35	15	30
	Chihuahua - la Cueva	(3,45)	-	2020	-	-	10	75	15	0
	La Cueva	3,1	2312	2070	2100	2040	25	40	15	20
Los Lobos	El Empachado haut	0,25	2290	2150	-	-	0	0	60	40
	El Empachado bas	(0,92)	2240	2095	-	-	0	80	10	10
Quartier Yerbanis										
Tepetate	Tepetate haut	4,66	2040	1970	-	-	80	20	0	0
	Tepetate milieu	(1,44)	1982	1955	-	-	100	0	0	0
	Tepetate bas	(2,65)	1990	1945	-	-	100	0	0	0
	La Cueva - Tepozan	(2,56)	1980	1945	-	-	100	0	0	0
Frances	Tepozan	4	2012	1980	-	-	100	0	0	0
Chiquihuitillo	Los Corrales	2,34	1942	1905	-	-	100	0	0	0
Quartier Gavilan										
Don Cruz	Nopal Tapon haut	1,43	1925	1870	-	-	0	0	100	0
	Nopal Tapon bas	(0,43)	-	-	-	-	0	0	100	0
Corrales	El Muerto	1,96	1992	1915	-	-	0	20	80	0
	Corrales - El Muerto	(1,65)	1992	1925			0	80	20	0
Coyotes	Oso Negro	0,27	1915	1885			0	0	100	0

Annexe X.2.2. Suite.

Quartier Enclos	Nom du preson	S en km²	Altitudes en mètres				Pourcentages de S aux pentes			
			Max.	Méd.	Haut	Bas	< 5 %	5-10	10-20	> 20 %
Quartier Pajaritos										
Palo Blanco	El Abogado	1,56	2025	1965	-	-	0	80	20	0
	El Penitas - Tullido	(0,78)	-	1965	-	-	0	100	0	0
Nana Prieta	La Capilla-Mez.-Palo	(4,85)	2085	2061	-	-	0	100	0	0
	Palo Blaco	1,56	2085	2025	-	-	0	100	0	0
Guadalupe	El Huevo	2,04	2025	1990	-	-	5	15	80	0
San Antonio	La Yerba	1,37	1980	1950	-	-	0	0	100	0
Quartier Atotonilco										
Tepozan	Fuete	1,37	2182	2125	-	-	15	35	50	0
Centinela	Coronela	0,45	2102	2070	-	-	0	100	0	0
	Penasco Chico	0,33	2070	2055	-	-	0	100	0	0
Penalito	El Gato	39,9	-	-	-	-	-	-	-	-
La Escendida	Los Cuates	(0,23)	-	1955	-	-	0	100	0	0
Sauz Mocho	Gran Preson	52,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	Molino	0,15	2031	2000	-	-	0	27	73	0
Quartier Indios										
La Campana	Sauz Mocho - Cerro	(14,8)	2450	2090	2070	2300	60	5	5	30
	Cerro de Enmedio	18,5	2450	2085	2070	2120	80	5	5	10
Quartier Alacran										
La Zorra	La Zorra	1,9	2252	2215	-	-	0	0	100	0

Annexe X.2.3. Caractéristiques phytoécologiques et géologiques des bassins versants.

Quartier Enclos	Nom du preson	S en km²	Formations végétales en pourcentages de S			Formations géologiques en pourcentages de S			
			Pât.	Pât. et arb.	Mat.	Rhy.	Calc.	All.	Cong
Quartier Penasco									
Zapata	Zapata	3,65	0	100	0	23	3	41	33
Aviacion	Tecolote	3,03	0	100	0	24	31	45	0
	Aviacion aval Telocote	(1,47)	0	100	0	11	28	61	0
C. Ancho	El Muerto	0,15	0	80	20	0	60	40	0
	Carboneras	1,06	0	80	20	53	28	19	0
El Pilon	Pastelero	1,68	0	33	77	0	15	68	17
	Islote haut versant	0,55	30	70	0	0	23	27	50
	Islote mi-versant	1,21	25	75	0	0	9	90	1
	Islote bas versant	(0,17)	0	100	0	0	0	30	70
Marrufo	El Blanco	0,68	100	0	0	100	0	0	0
	Temosachic	0,52	50	50	0	100	0	0	0
	La Cuna	0,33	90	10	0	14	18	14	54
Penasco	Penasco Grande	19,7	20	80	0				
San Miguel	El Viejo	1,76	71	29	0	100	0	0	0
	Bordos Cuates haut	0,26	0	100	0	100	0	0	0
	Bordos Cuates bas	(0,38)	0	100	0	100	0	0	0
	Mono	0,53	0	100	0	100	0	0	0
	Colorado	0,19	0	100	0	100	0	0	0
La Carroza	Las Tuzas haut	0,85	0	100	0				
	Las Tuzas bas	1,18	0	100	0	46	0	54	0
	Chapaderos	1,9	0	100	0	100	0	0	0
	Limonas	0,18	0	100	0	100	0	0	0
Quartier Los Novios									
Novios	Borregas Haut	0,21	20	80	0	100	0	0	0
	Borregas bas	(0,64)	0	100	0	50	0	50	0
	Tres Bolas haut	0,4	100	0	0	100	0	0	0
	Tres Bolas bas	(0,19)	0	100	0	50	0	50	0
San Marcos	San Marcos	12,7	60	40	0	30	4	56	10
Mezquite	El Tullido	3,98	56	44	0	57	0	43	0
	El Mezquite	3,27	0	100	0	27	0	49	24
Quartier San Marcos									
Xoconoxtle	El Tapado	2,02	100	0	0	35	0	57	8
	Chihuahua - la Cueva	(3,45)	90	10	0	8	0	28	64
	La Cueva	3,1	90	10	0	38	0	59	3
Los Lobos	El Empachado haut	0,25	0	100	0	60	0	40	0
	El Empachado bas	(0,92)	0	100	0	37	0	63	0
Quartier Yerbanis									
Tepetate	Tepetate haut	4,66	60	40	0	0	22	78	0
	Tepetate milieu	(1,44)	0	100	0	0	37	63	0
	Tepetate bas	(2,65)	90	10	0	0	23	77	0
	La Cueva - Tepozan	(2,56)	0	100	0	5	59	36	0
Frances	Tepozan	4	0	100	0	1	26	73	0
Chiquihuitillo	Los Corrales	2,34	0	100	0	81	19	0	0
Quartier Gavilan									
Don Cruz	Nopal Tapon haut	1,43	0	100	0	0	0	100	0
	Nopal Tapon bas	(0,43)	0	100	0	0	0	100	0
Corrales	El Muerto	1,96	0	100	0	49	25	26	0
	Corrales - El Muerto	(1,65)	0	100	0	67	33	0	0
Coyotes	Oso Negro	0,27	0	92	8	0	0	100	0

Annexe X.2.3. Suite.

Quartier Enclos	Nom du preson	S en km²	Formations végétales en pourcentages de S			Formations géologiques en pourcentages de S			
			Pât.	Pât. et arb.	Mat.	Rhy.	Calc.	All.	Basa.
Quartier Pajaritos									
Palo Blanco	El Abogado	1,56	60	40	0	70	30	0	0
	El Penitas - Tullido	(0,78)	80	20	0	90	10	0	0
Nana Prieta	La Capilla-Mez.-Palo	(4,85)	0	100	0	95	5	0	0
	Palo Blaco	1,56	0	100	0	100	0	0	0
Guadalupe	El Huevo	2,04	0	100	0	76	5	0	19
San Antonio	La Yerba	1,37	0	100	0	87	13	0	0
Quartier Atotonilco									
Tepozan	Fuente	1,37	90	10	0	70	20	0	10
Centinela	Coronela	0,45	0	100	0	100	0	0	0
	Penasco Chico	0,33	0	100	0	100	0	0	0
Penalito	El Gato	39,9	10	90	0				
La Escendida	Los Cuates	(0,23)	0	100	0	22	56	22	0
Sauz Mocho	Gran Preson	52,7	10	90	0				
	Molino	0,15	0	91	9	0	0	0	100
Quartier Indios									
La Campana	Sauz Mocho - Cerro	(14,8)	70	15	15	16	63	0	21
	Cerro de Enmedio	18,5	85	10	5	2	68	0	30
Quartier Alacran									
La Zorra	La Zorra	1,9	90	5	0	0	0	0	100

Annexe X.3.1. Relation entre l'intensité pluviométrique maximale et la pluie journalière sur le bassin versant de El Viejo (176 ha).

Date	Pluie journalière	Intensité maximale en 30 mn	Date	Pluie journalière	Intensité maximale en 30 mn
	mm	mm/h		mm	mm/h
31-05-96	6,3	12,6	17-01-97	7,6	9,5
12-06-96	5,7	9,8	18-01-97	14,6	4,7
15-06-96	13,0	12,3	19-01-97	8,8	7,3
16-06-96	12,3	6,6	01-03-97	0,9	1,8
25-06-96	12,8	7,8	13-03-97	5,4	10,8
26-06-96	1,1	1,0	22-03-97	6,9	5,9
30-06-96	7,4	4,9	30-03-97	1,8	3,1
05-07-96	1,7	3,4	31-03-97	1,8	3,6
10-07-96	6,0	4,2	07-04-97	3,6	5,9
11-07-96	49,1	74,0	26-04-97	11,6	
14-07-96	13,1	12,0	09-05-97	29,4	
23-07-96	1,0	1,2	10-05-97	2,7	
01-08-96	5,6	9,7	22-05-97	3,1	
05-08-96	2,2	2,2	23-05-97	9,9	
07-08-96	33,7	46,8	26-06-97	1,3	2,0
13-08-96	26,4	28,0	28-06-97	26,8	14,0
14-08-96	23,6	41,4	29-06-97	3,0	2,1
20-08-96	30,9	40,0	11-07-97	2,7	
23-08-96	15,4	13,6	19-07-97	3,1	
24-08-96	18,3	13,5	20-07-97	44,3	
28-08-96	9,9	17,0	21-07-97	4,4	
29-08-96	4,0	8,0	22-07-97	5,7	11,4
30-08-96	6,7	7,6	09-08-97	18,1	20,0
31-08-96	23,5	8,3	13-08-97	10,2	9,0
02-09-96	21,0	22,7	16-08-97	6,8	8,0
03-09-96	16,8	16,2	28-08-97	9,7	14,1
04-09-96	2,1	1,4	29-08-97	4,2	2,7
07-09-96	5,9	8,8	04-09-97	2,9	6,0
12-09-96	8,3	8,2	07-09-97	10,5	8,6
13-09-96	14,9	12,8	11-09-97	4,0	3,9
18-09-96	14,3	12,9	21-09-97	5,1	8,4
20-09-96	1,0	1,5	23-09-97	18,5	14,5
25-09-96	15,8	29,4	24-09-97	20,5	33,8
27-11-96	1,8	3,0	04-10-97	1,3	2,6
28-11-96	14,3	7,8	10-10-97	23,3	36,2
			11-10-97	12,6	7,8
			07-11-97	6,6	4,0
			11-11-97	8,5	4,7

Annexe X.3.2. Relations entre l'intensité pluviométrique maximale et la pluie journalière.

Bassin versant El Muerto, 16 ha

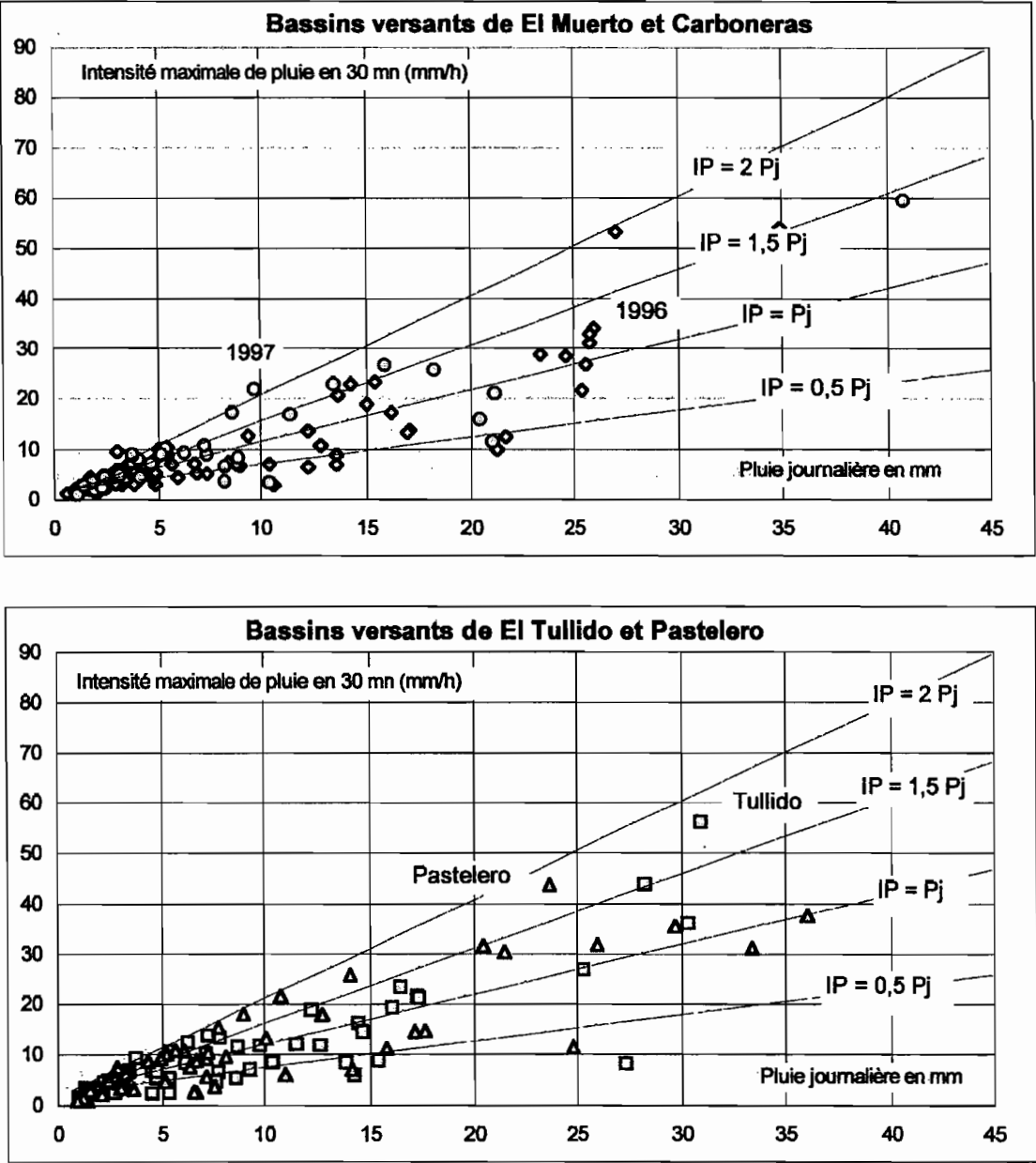
Bassin versant Carboneras, 106 ha

Date	Pluie journalière moyenne mm	Intensité maximale en 30 mn mm/h	Date	Pluie journalière moyenne mm	Intensité maximale en 30 mn mm/h	Date	Pluie journalière mm	Intensité maximale en 30 mn mm/h
31-05-96	1,3	2,6	29-05-96	1,3	1,8	10-03-97	11,4	16,8
01-06-96	3,0	6,0	12-06-96	3,6	3,8	21-03-97	6,2	9,3
15-06-96	8,4	12,6	13-06-96	3,0	9,6	30-03-97	1,7	1,9
16-06-96	4,8	4,8	15-06-96	25,8	31,1	07-04-97	4,1	4,4
25-06-96	1,9	3,5	16-06-96	7,3	5,1	26-04-97	10,4	3,3
30-06-96	4,0	6,7	25-06-96	3,1	4,3	27-04-97	2,1	2,4
06-07-96	4,8	5,2	30-06-96	5,6	7,0	09-05-97	21,0	11,5
08-07-96	3,4	5,7	06-07-96	4,3	6,0	10-05-97	1,3	2,8
10-07-96	2,0	1,2	07-07-96	0,6	1,2	22-05-97	2,5	3,7
11-07-96	8,8	6,9	08-07-96	3,9	7,8	11-06-97	2,4	4,4
14-07-96	6,8	5,2	10-07-96	3,8	3,0	13-06-97	5,3	10,2
06-08-96	4,3	8,8	11-07-96	9,0	6,7	17-06-97	2,4	2,1
07-08-96	34,9	53,9	14-07-96	13,5	8,8	21-06-97	1,1	1,0
09-08-96	2,4	4,8	16-07-96	1,0	2,0	26-06-97	4,6	7,2
13-08-96	24,6	28,4	24-07-96	1,0	1,6	10-07-97	1,9	1,9
14-08-96	12,8	10,8	06-08-96	3,5	4,5	11-07-97	9,7	21,8
18-08-96	15,0	18,9	07-08-96	27,1	53,2	18-07-97	7,3	9,0
20-08-96	4,8	8,0	13-08-96	23,3	28,8	19-07-97	40,8	59,4
23-08-96	15,4	23,3	14-08-96	12,2	13,6	21-07-97	18,3	25,7
24-08-96	17,0	13,2	18-08-96	4,8	3,0	22-07-97	1,5	3,0
27-08-96	5,0	10,0	20-08-96	6,7	7,2	29-07-97	8,2	3,6
28-08-96	2,3	4,7	21-08-96	1,5	3,0	30-07-97	3,1	4,9
30-08-96	16,2	17,2	23-08-96	13,6	20,6	08-08-97	3,7	7,4
31-08-96	21,2	9,9	24-08-96	17,1	13,7	14-08-97	1,7	3,4
02-09-96	25,8	33,0	27-08-96	5,4	9,0	15-08-97	1,6	3,2
04-09-96	5,9	4,4	28-08-96	8,4	7,4	27-08-97	1,5	3,0
07-09-96	3,4	3,8	30-08-96	14,2	22,8	28-08-97	15,9	26,6
09-09-96	3,0	6,0	31-08-96	21,6	12,4	29-08-97	2,3	2,4
12-09-96	3,8	5,4	02-09-96	26,0	34,1	30-08-97	1,8	3,6
13-09-96	12,2	6,5	04-09-96	1,7	4,4	04-09-97	3,7	7,4
18-09-96	25,6	26,7	07-09-96	4,1	4,2	06-09-97	8,6	17,2
02-10-96	5,4	10,4	09-09-96	3,2	3,0	07-09-97	8,9	8,4
03-10-96	10,6	2,9	12-09-96	4,7	4,1	08-09-97	4,0	8,0
04-10-96	2,9	3,1	13-09-96	13,5	6,9	11-09-97	3,7	8,7
27-11-96	3,5	7,0	18-09-96	25,4	21,6	21-09-97	3,7	9,0
			27-11-96	10,4	7,0	22-09-97	1,4	2,8
						23-09-97	5,1	8,9
						24-09-97	7,2	10,7
						04-10-97	8,2	6,6
						06-10-97	13,4	22,8
						10-10-97	21,1	21,0
						11-10-97	20,4	15,9

Annexe X.3.3. Relations entre l'intensité pluviométrique maximale et la pluie journalière.

Bassin versant El Tullido (398 ha)			Bassin versant Pastelero (168 ha)								
Date	Pluie jour.	Intensité max. 30 mn	Date	Pluie jour.	Intensité max. 30 mn	Date	Pluie jour.	Intensité max. 30 mn	Date	Pluie jour.	Intensité max. 30 mn
	mm	mm/h		mm	mm/h		mm	mm/h		mm	mm/h
31-05-96	3,0	6,0	10-03-97	28,3	43,8	01-08-98	5,2	10,0	31-03-97	1,1	1,3
			21-03-97	6,1	8,2	12-08-98	1,5	3,0			
15-06-96	1,3	3,3	30-03-97	1,6	2,5	13-06-96	3,4	6,8	07-04-97	5,1	4,6
16-06-96	1,9	2,7				25-06-96	2,8	7,4	14-04-97	6,6	2,5
29-06-96	7,7	6,5	07-04-97	4,7	5,5	30-06-96	6,3	7,5	26-04-97	6,5	2,6
			14-04-97	9,5							
06-07-96	9,3	7,1	26-04-97	14,2		09-07-96	2,3	4,6	09-05-97	14,1	7,1
08-07-96	3,4	6,8				10-07-96	7,1	9,2	22-05-97	6,6	8,7
11-07-96	4,7	5,3	09-05-97	3,4		11-07-96	20,4	31,5			
12-07-96	1,7	3,4	22-05-97	4,3		12-07-96	2,7	5,4	11-06-97	2,7	5,2
14-07-96	5,3	10,6				14-07-96	11,0	6,0	19-06-97	1,2	2,4
15-07-96	1,5	2,1	12-06-97	6,3					21-06-97	3,6	3,1
25-07-96	1,0	1,5	26-06-97	9,0		02-08-96	1,6	3,2			
			28-06-97	18,6		05-08-96	7,1	5,6	08-07-97	1,5	3,0
05-08-96	3,1	3,9				07-08-96	29,7	35,4	09-07-97	1,1	2,2
06-08-96	17,3	21,6	08-07-97	2,2		13-08-96	21,4	30,3	10-07-97	2,9	4,4
07-08-96	7,2	13,7	10-07-97	5,4		14-08-96	10,1	13,3	11-07-97	4,3	8,6
08-08-96	2,2	4,4	11-07-97	13,3		18-08-96	3,1	3,6	18-07-97	1,2	1,4
09-08-96	2,4	4,8	18-07-97	8,1		20-08-96	14,0	25,8	19-07-97	33,4	31,0
13-08-96	37,9		19-07-97	8,6	5,2	23-08-96	12,7	17,9	21-07-97	23,6	43,7
14-08-96	16,9		20-07-97	14,6	14,5	24-08-96	17,2	14,6	22-07-97	2,4	4,8
18-08-96	12,2	18,8	21-07-97	11,5	12,0	28-08-96	7,7	15,4			
20-08-96	2,2	3,7	22-07-97	5,3	5,2	31-08-96	24,8	11,5	09-08-97	7,2	10,4
23-08-96	16,5	23,4	29-07-97	4,5	6,7				13-08-97	2,4	4,8
24-08-96	12,6	11,8	30-07-97	8,7	11,6	02-09-96	26,0	31,8	16-08-97	0,9	1,0
27-08-96	2,2	4,4				04-09-96	1,4	1,0	28-08-97	3,2	6,2
28-08-96	1,6	3,2	07-08-97	4,7	6,6	07-09-96	3,3	6,6	29-08-97	3,0	3,4
29-08-96	1,4	2,8	10-08-97	1,4	2,4	08-09-96	1,6	3,2			
30-08-96	14,4	16,2	14-08-97	7,1	10,1	12-09-96	8,1	9,6	04-09-97	9,0	18,0
31-08-96	30,3	36,1				13-09-96	17,7	14,7	07-09-97	7,5	3,7
			06-09-97	16,1	19,3	18-09-96	36,0	37,6	11-09-97	6,0	10,8
02-09-96	30,9	56,1	07-09-97	27,4	8,1	25-09-96	2,1	2,1	21-09-97	4,9	9,2
04-09-96	14,2	5,8	08-09-97	6,2	12,4				23-09-97	15,8	11,2
07-09-96	2,7	2,4	11-09-97	4,6		03-10-96	40,7				
09-09-96	3,7	9,2	21-09-97	3,9		04-10-96	25,1		06-10-97	5,6	10,8
12-09-96	10,4	8,4	23-09-97	14,4							
13-09-96	13,8	8,4				27-11-96	10,8	21,6			
18-09-96	25,3	26,9	04-10-97	2,0	2,6						
			10-10-97	17,4	21,3						
02-10-96	7,8	13,4	11-10-97	9,8	11,8						
03-10-96	50,1										
04-10-96	23,6		07-11-97	4,5	2,3						
05-10-96	5,3	2,4	11-11-97	7,6	4,7						
27-11-96	2,8	5,3									
28-11-96	15,4	8,7									

Annexe X.3.4. Relations entre l'intensité de pluie maximale en 30 minutes et la pluie journalière.



ANNEXES DU CHAPITRE 11

Distribution du bétail par enclos	: XI.1.
Infiltration Müntz des retenues	: XI.2.

Annexe XI.1. Inventaire du bétail en 1998 dans le ranch.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1989	1990	Jan/Abr	Jan/Abr	Mai/Dec	Jan/Abr	Mai/Dec	Consommation d'eau (m ³)
1. Enclos Los Indios																
Campana		59									59		62	283	608	
Aguaquito (Becerras p/vta)							114					114		342		
Aguaquito (Vacas p/vta)							157	3	5			165		792		
Huacal									29		29		31	139	304	
Cerro de Enmedio				60							60		63	288	617	
Vaqueros Chico																
Vaqueros																
Caporal (1)			6	17					34		23	34		138		
Jarillas					47						47		50	226	490	
Escalon			42								42		44	202	431	
Calabazas			44								44		47	211	461	
Indios (1)						165					165			792	0	
Encinos		72									72		77	346	755	
Jaralillo / Romeral																
(1) Becerras p/c						165					165	114				
Total de vaches	72	59	92	77	47				34		353	165	353			
Total de taureaux			6	17							23	34	21			
Total (vaches et taureaux)	72	59	98	94	47	165			34		541	313	374	3758	3665	
2. Enclos Atotonilco																
Centinela					95						95		101	456	990	
Tepozan	15		1		3		1		19	23	62		66	298	647	
Loma Alta			100								100		106	480	1039	
Agua Nueva																
Gato																
Ojo de Agua																
Pefolito (Becerras p/vta)							232					232		696		
Cebada																
Alamos (2)					12	32					44			264		
Alamos (Novillos p/vta)							264					264		792		
Escondida																
Molino (Ganado Suizo)	3	7	5	1	2	2	1	3	2	6	32		32	154	314	
Paso de la Cruz								33			33		35	158	343	
Sauz Mocho				96							96		102	461	1000	
Becerras et Novillos												496				
Total de vaches	18		106	97	100	2	1	36	21	29	418		418			
Total de taureaux					12	32					44		24			
Total (vaches et taureaux)	18		106	97	112	34	1	36	21	29	462	496	442	3758	4332	
3. Enclos Peñasco																
Las vacas									19	65	84		89	403	872	
Las Vacas (Becerras p/vta)												70		210		
Zapata (Ganado Suizo)	11		4	2		3	2		7		29		29	139	284	
Aviacion																
Cerro Ancho					50						50		53	240	519	
Pilon (Vacas p/vta)							11	8	5	4		28		134		
Marrufo			79								79		84	379	823	
Peñasco				86							86		92	413	902	
San Miguel (2)						150					150			450		
Carroza	81										81		86	389	843	
(2) Becerras p/c ou p/v						150					150	70				
Total de vaches	92		83	88	50	3	2		7		409	28	409			
Total de taureaux													24			
Total (vaches et taureaux)	92		83	88	50	153	2		7		559	98	433	2758	4243	

Annexe XI.1. Suite...

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1988	1989	1990	Jan/Abr	Jan/Abr	Mai/Dec	Jan/Avr	Mai/Dec
	Consommation d'eau (m³)														
4. Enclos Los Novios															
Mezquite				69						69			73	331	715
Bordo					88					88			93	422	911
Carboneras	64									64			68	307	666
Novios			89							89			94	427	921
Susana		19							54	73			77	350	755
Herradero		59								59			63	283	617
Paso de la Cruz (P. Fr. Ato.)						2		34		36			38	173	372
Total de vaches	64	78	89	69	88	2		34	54	478			478		
Total de taureaux													28		
Total (vaches et taureaux)	64	78	89	69	88	2		34	54	478			506	2294	4959
5. Enclos San Marcos															
C. Colorado / Estancia															
Cerritos / Estancia															
Cuestion															
Sotoles					54					54			57	259	559
Averiguacion															
Saucillo	45									45			47	216	461
Saucillo (becerras p/vta)											40			120	
Saucillo (3)	7	23								1	30			144	
Saucillo (toros p/vta)												1		6	
Asadero									18	27	45		48	216	470
San Marcos			38							38			40	182	392
Parian								32		32			34	154	333
Parian (becerras p/vta)											30			90	
Rusias	39	21						19		79			83	379	813
Rusias (becerras p/vta)											70			210	
Xoconostle	25	66								91			96	437	941
Lobos	20			76						96			101	461	990
Becerras															
Total de vaches	45	66	38	76	54				18	27	480		480		
Total de taureaux	7	23								1	30	1	26		
Total (vaches et taureaux)	52	89	38	76	54				18	28	510	141	506	2874	4959
6. Enclos Yerbanis															
Embarque Chico															
Embarque Grande															
Chiquihuitillo				59					1	60			63	288	617
Yerbanis					28					28			30	134	294
Congo															
Cerritos (Vacas p/vta)	1	4	3					8	1	2		19			
Frances	53	37						5		17	112		117	538	1147
Frances (becerras p/vta)												110		330	
Frances (1er Empadre)					3	70							73		715
Tepetate	11	44								55			58	264	568
Durazno															
Parian								15		15			16	72	157
Becerras															
Total de vaches	11	44		59	28			15	1	15	285	19	355		
Total de taureaux													18		
Total (vaches et taureaux)	11	44		59	28			15	1	15	285	129	373	1698	3655

Annexe XI.1. Suite...

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1988	1989	1990	Jan/Abr	Jan/Abr	Mai/Dec	Jan/Avr	Mai/Dec
	Consommation d'eau (m³)														
7. Enclos Alacran															
San Simon	71										71		75	341	735
Liebres	7	28	8				3	20			66		70	317	686
Liebres (becerras p/vta)												60		180	
Liebres (1er Empadre)						103							103		1009
Alacran								42			42		45	202	441
Jaralillo / Trampa de Jaralillo															
S. Mocho															
Trampa de Sheriff															
Sauces de Marin (3)							296				296		296	1421	2901
Carreta															
Macho grande					50						50		53	240	519
Leon			42								42		44	202	431
Zorra		73									73		77	350	755
Trampa del Comisario (4)	21	14									35			210	
(3) Becerras p/c															
Total de vaches	71	73	42		50			42			344		444		
Total de taureaux	21	14									35		23		
Total (vaches et taureaux)	92	87	42		50		296	42			675	60	763	3462	7477
8. Enclos Rodeo															
Tijera															
Angeles									10	48	58		61	278	598
Cuervo / Sta Efigenia (4)							155				155		155	465	1519
Santa Efigenia					62							62		186	
Gachupin															
Nogalito / Changa															
Cardonal					49						49		52	235	510
Majada Honda		48									48		51	230	500
Rodeo			75								75		79	360	774
Carrera (1er Empadre)						63							63		617
Perdido (Novillos p/vta)						60						60		180	
Perdido (1er Empadre)					2	55							57		559
Romeral				66							66		70	317	686
(4) Becerras p/c															
Total de vaches		48	75	66	49			155			155	122	155		
Total de taureaux									10	48	296		411		
Total (vaches et taureaux)		48	75	66	49		155		10	48	451	122	588	2252	5762

Annexe XI.1. Suite.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	1990	Jan/Abr	Jan/Abr	Mai/Dec	Jan/Avr	Mai/Dec
	Consommation d'eau (m³)														
9. Enclos Pajaritos															
Pajaritos		69									69		73	331	715
San Felipe (5)							74				74		74	222	725
San Felipe (Novillos p/vta)						27						27		81	
Molcajete								31			31		33	149	323
San Antonio			63						15	20	98		103	470	1009
San Jose					96						96		101	461	990
Palo Blanco (Vacas p/v)							31	8				39		187	
Palo Blanco							148					148		444	
Palo Blanco (p/v)						95							95		931
Nana Petra							138					138		414	
Nana Petra (Suizo)						29					29		31	139	304
Guadalupe (Sulzo)				1	17						18		19	86	186
Guadalupe (1er Empadre)					4	81							85		833
Paso de la Cruz		4	2					2			8		9	38	88
(5) Becerras p/c							74				74	313	74		
Total de vaches		73	65	1	113	29		33	15	20	349	39	521		
Total de taureaux													28		
Total (vaches et taureaux)		73	65	1	113	29	74	33	15	20	423	352	623	3023	6105
10. Enclos Gavilan															
Adjuntas					95						95		100	456	980
Ceja de Luna		74									74		78	355	764
Don Cruz		70									70		74	336	725
Hacha (6)						80					80			240	
Coyotes (Vacas p/vta)							51			1		52		250	
Coyotes (Becerras p/vta)					42							42		126	
Coyotes (1er Empadre)					2	50							52		510
California				56							56		59	269	578
Corrales (s/destetar)	20	8	3								31		33	149	323
Corrales (becerras p/vta)												30		90	
Muerto			44						11		55		58	264	568
Calderona (vacas p/v)															
Guerra (5)			52	20							72			432	
Molcajete (P. Fr. Pajaritos)								16			16		17	77	167
(6) Becerras p/c						80					80	72			
Total de vaches	70	74	44	56	95			16	11		397	82	447		
Total de taureaux			52	20							72		24		
Total (vaches et taureaux)	70	74	96	76	95	80		16	11		549	154	471	3043	4616

Annexe XI.2. Infiltrations obtenues sur Müntz sous une charge de 10 cm dans les cuvettes des *presones*.

El Muerto						Carboneras					
Fond de la retenue			Sur le bord			Fond de la retenue			Sur le bord		
Temps	Infiltration	Infiltration	Temps	Infiltration	Infiltration	Temps	Infiltration	Infiltration	Temps	Infiltration	Infiltration
mn	mm	mm/jour	mn	mm	mm/jour	mn	mm	mm/jour	mn	mm	mm/jour
5	0,21	302	5	1,40	2016	19	0,11	158	3	1,00	1440
10	0,19	274	11	0,85	1224	35	0,09	130	6	1,00	1440
15	0,20	288	16	0,78	1123	70	0,02	29	9	0,70	1008
20	0,31	446	21	0,81	1166	80	0,04	50	12	0,50	720
25	0,11	158	26	0,82	1181	97	0,03	43	15	0,50	720
30	0,09	130	31	0,41	590	103	0,02	23	18	0,33	475
35	0,19	274	36	0,58	835	110	0,01	17	21	0,17	245
40	0,12	166	41	0,62	893	125	0,01	14	30	0,40	576
45	0,14	202	46	0,40	576	140	0,05	65	39	0,28	403
50	0,12	173	51	0,39	562	180	0,04	50	48	0,28	403
55	0,09	130	56	0,55	792	210	0,02	32	57	0,18	259
60	0,11	164	61	0,51	734	250	0,02	29	83	0,08	115
73	0,04	58	71	0,54	778	301	0,00	6	100	0,15	216
75	0,05	72	81	0,31	446	350	0,01	9	120	0,08	115
90	0,17	245	91	0,43	619	390	0,01	8	134	0,02	30
105	0,09	130	101	0,42	605	440	0,00	4	150	0,09	130
127	0,10	144	111	0,31	446	490	0,00	5	170	0,02	29
240	0,05	72	121	0,33	475	550	0,01	8	183	0,04	50
903	0,00	4	131	0,41	590	605	0,00	6	204	0,02	24
993	0,01	9	141	0,32	461				224	0,02	29
1260	0,00	4	151	0,28	403				244	0,02	29
			161	0,41	590				312	0,02	26
			171	0,48	691				350	0,02	29
			181	0,31	446						
			191	0,32	461						
			201	0,42	605						
			211	0,31	446						
			221	0,22	317						
			231	0,41	590						
			241	0,31	446						
			251	0,21	302						
			261	0,22	317						
			271	0,19	274						
			281	0,28	403						
			291	0,32	461						
			301	0,38	547						
			311	0,18	259						
			321	0,19	274						
			331	0,42	605						
			341	0,27	389						
			351	0,19	274						
			361	0,20	281						
			371	0,31	446						
			381	0,19	274						
			391	0,29	418						
			401	0,19	274						
			401	0,21	302						
			470	0,19	270						
			615	0,14	200						

Annexe XI.2. Suite.

Molino						Pastelero		
Fond de la retenue			Sur le bord			Fond de la retenue		
Temps	Infiltration	Infiltration	Temps	Infiltration	Infiltration	Temps	Infiltration	Infiltration
mn	mm	mm/jour	mn	mm	mm/jour	mn	mm	mm/jour
10	0,44	634	10	0,24	346	15	0,21	302
15	0,40	576	29	0,16	230	22	0,20	288
20	0,20	288	42	0,15	216	40	0,15	216
26	0,33	475	58	0,18	259	50	0,20	288
30	0,25	360	74	0,16	230	70	0,19	274
35	0,20	288	90	0,15	216	79	0,13	187
40	0,20	288	103	0,15	216	93	0,16	230
45	0,40	576	115	0,17	245	103	0,14	202
50	0,40	576	126	0,13	187	120	0,18	259
55	0,20	288	138	0,21	302	130	0,19	274
64	0,33	475	153	0,16	230	185	0,15	216
88	0,21	302	167	0,14	202	210	0,13	187
108	0,25	360	180	0,15	216	239	0,10	144
123	0,33	475	194	0,12	173	265	0,17	245
142	0,26	374	128	0,10	144	303	0,15	216
163	0,14	202	185	0,09	130	354	0,12	173
225	0,20	288	230	0,08	115	392	0,14	202
305	0,21	302	290	0,09	122	446	0,10	144
410	0,18	259	315	0,10	137	509	0,08	115
520	0,19	266	385	0,09	130	570	0,14	202
			485	0,09	131			

El Tullido					
Fond de la retenue			Sur le bord		
Temps	Infiltration	Infiltration	Temps	Infiltration	Infiltration
mn	mm	mm/jour	mn	mm	mm/jour
19	0,05	75	3	0,49	708
35	0,04	53	9	0,55	797
50	0,04	56	11	0,49	700
70	0,05	67	14	0,37	536
85	0,03	43	19	0,42	608
103	0,03	36	23	0,31	452
110	0,02	27	31	0,22	314
125	0,01	14	38	0,38	550
140	0,03	36	44	0,31	440
161	0,04	50	62	0,25	359
210	0,02	32	83	0,13	193
250	0,02	32	93	0,25	364
285	0,00	6	108	0,21	309
351	0,01	15	120	0,08	120
390	0,01	8	140	0,07	97
469	0,00	4	158	0,09	127
529	0,00	5	175	0,02	28
614	0,00	5	189	0,08	108
662	0,01	9	210	0,05	69
720	0,01	12	249	0,02	22
			332	0,02	33

ANNEXES DU CHAPITRE 12

Principales espèces végétales	: XII.1.
Niveau statique des forages	: XII.2.
Réseau de distribution	: XII.3.

Annexe XII.1. Principales espèces végétales dans le ranch Atotonilco.

Très consommées

- 1 *Andropogon perforatus*
- 2 *Bouteloua chrondrosioides*
- 3 *Bouteloua curtipendula*
- 4 *Bouteloua gracilis*
- 5 *Bouteloua hirsuta*
- 6 *Cynodon dactylon*
- 7 *Mulhenbergia monticola*
- 8 *Mulhenbergia wrighiti*
- 9 *Setaria macrostachya*
- 10 *Sporobolus airoides*

Non consommées

- 28 *Alosya gratissima*
- 29 *Aristida adscensionis*
- 30 *Bouteloua barbata*
- 31 *Bouteloua simplex*
- 32 *Eragrostis diffusa*
- 33 *Mulhenbergia arizonica*
- 34 *Mulhenbergia porteri*
- 35 *Scleropogon brevifolius*
- 36 *Tridens grandiflorus*
- 37 *Tridens puichellus*

Peu consommées

- 11 *Acacia constricta*
- 12 *Acacia farneciana*
- 13 *Acacia schaffneri*
- 14 *Andropogon hirtuflorus*
- 15 *Aristida glabrata*
- 16 *Aristida roemeriana*
- 17 *Chloris submutica*
- 18 *Dasyllirion wheleri*
- 19 *Elyonorus barbiculmis*
- 20 *Eragrostis intermedia*
- 21 *Heteropogon contortus*
- 22 *Leptochloa dubia*
- 23 *Mulhenbergia risida*
- 24 *Panicum obtusum*
- 25 *Phytocellobium elasticotrichum*
- 26 *Prosopis glandulosa*
- 27 *Trichachne californica*

Envahissantes

- 38 *Brickelia spinulosa*
- 39 *Chloris virgata*
- 40 *Compositae*
- 41 *Parthenium incanum*

Annexe XII.2. Profondeurs et niveaux statiques de l'eau des forages du ranch Atotonilco.

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
1 Agua Nueva			
Noria	07-34	20,7	
Perforage	10-59	45,7	13,7
Révision	05-65	44,2	21,3
Révision	03-91	34,4	24,4
Révision	10-71	44,0	
Révision et perforage	04-95	45,7	24,4
2 Aguajito			
Perforage	10-61	50,3	18,3
Révision	06-65	50,3	22,9
Révision	06-95	33,8	31,1
Révision et perforage	11-95	43,0	23,5
3 Adjuntas			
Perforage	08-29	30,5	14,6
Révision	03-71	27,4	15,5
4 Avlaclon			
Perforage	10-85	140,8	9,1
5 Alacran			
Perforage	03-50	192,0	78,6
Révision	05-87	93,6	
6 La Bota			
Perforage	08-50	84,1	58,2
Révision	08-57	76,2	56,4
Révision et perforage	08-64	94,5	57,9
Révision	05-74	70,7	48,5
Révision et perforage	12-74	94,5	48,5
Révision	05-76	89,0	59,7
7 Cajon de Saucillo			
Perforage	03-24	100,0	6,1
Révision	01-30	89,0	33,5
Révision et perforage	09-41	89,6	
Révision et perforage	08-68	121,3	39,6
Révision	02-78	114,3	30,5
8 Calabazas			
Perforage	12-29		
Révision et perforage	08-60	36,6	14,9
Révision	10-71	33,5	18,3
Révision	02-78	33,5	14,0
9 California			
Perforage	03-50		
Révision et perforage	04-61	79,2	44,2
Révision	01-78	78,0	47,2

Annexe XII.2. Suite

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
10 Calderona			
Perforage	06-29	40,5	12,2
Révision et perforage	05-43	40,2	16,8
Révision et perforage	10-50	40,2	16,8
Révision	05-66	39,9	19,8
Révision	07-72	39,0	23,8
Révision	07-83	29,0	21,6
11 Cardonal			
Perforage	02-50	65,2	41,8
12 La Carreta			
Perforage	08-60	200,3	138,1
13 La Carrera			
Perforage	07-56	170,7	132,6
Révision	04-74	164,6	132,6
14 La Carroza			
Perforage	07-59	129,2	100,6
Révision et perforage	08-62	137,2	99,1
Révision	05-65	134,7	102,7
Révision	05-72	133,5	92,4
Révision et perforage	11-74	137,2	83,2
Révision et perforage	04-80	152,4	
15 Casa Grande			
Perforage	07-25		
16 Centinela			
Perforage	12-29	27,4	17,1
Révision et perforage	12-50	27,4	17,1
Révision	11-65	26,5	23,8
Révision et perforage	04-72	32,3	15,2
Révision et perforage	06-83	53,6	23,2
17 Ceja Prieta			
Perforage	05-29	50,6	19,8
Révision	04-31	38,7	21,6
Révision et perforage	04-37	33,2	
Révision et perforage	10-50	50,6	19,8
Révision et perforage	03-70	59,4	
Révision et perforage	04-83	34,1	
18 Ceja Prieta 2			
Perforage	04-73	91,4	
	08-73	75,3	23,8
Révision et perforage	11-74	91,4	20,7

Annexe XII.2. Suite

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
19 Congo			
Perforage	12-29	90,8	18,3
Révision et perforage	08-59	90,8	
Révision	11-65	88,4	57,9
Révision et perforage	07-66	182,9	39,6
Révision	09-71	164,6	24,4
20 Corrales			
Perforage	05-29	33,5	14,6
Révision et perforage	09-50	33,5	14,0
Révision	02-66	26,8	21,0
Révision et perforage	03-95	94,8	
21 Coyotes			
Perforage	08-29		
Révision et perforage	07-60	143,3	39,6
Révision	09-73	107,9	36,6
22 Charcas de las Liebres			
Perforage	09-29		
Révision et perforage	08-60	129,8	77,4
Révision	09-71		81,7
23 Don Cruz			
Perforage	10-59	93,0	38,1
Révision et perforage	11-74	70,1	26,8
24 Divisadero			
Perforage		268,2	79,2
Revisado	09-72	34,4	18,9
Révision et perforage	10-74	268,2	
Révision et perforage	07-81	283,2	85,3
25 El Frances			
Perforage	04-50	72,5	30,8
Révision	12-59	61,6	33,2
Révision	08-79	58,8	35,4
26 Francisco Gomez			
Perforage	06-74	121,0	32,0
Révision et perforage	01-76	153,6	100,6
Révision	04-76	153,6	103,0
Révision	03-78	153,3	105,2
27 Gachupin			
Perforage	11-29	32,9	22,6
Révision	02-58		
Révision	05-58	32,3	
Révision	04-66	32,0	25,0
Révision et perforage	06-76	45,7	25,3
Révision et perforage	11-95	51,8	

Annexe XII.2. Suite

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
28 El Herradero			
Perforage	04-49	38,1	19,5
Révision	01-61	36,0	23,8
Révision	02-66	36,0	25,9
Révision	09-70		
29 Jarillas			
Perforage	05-62	29,0	13,1
30 Jaralito de la Zorra			
Perforage	02-63	32,3	10,7
Révision et perforage	05-65	52,7	13,7
31 Ladrillo			
Perforage	02-56	67,7	12,5
Révision	06-65	66,1	13,4
Révision	07-72	65,5	11,9
32 Loma Alta			
Perforage	12-29	15,2	4,3
Révision et perforage	05-66	50,9	10,7
Révision et perforage	06-83	48,8	8,2
Révision	07-83	30,5	9,1
Révision et perforage	01-96	199,9	
33 El Leon			
Perforage	04-50	128,3	67,4
Révision	03-72	125,0	71,3
34 Los Angeles			
Perforage	12-29	43,3	35,7
Révision	12-76	57,9	39,6
35 Majada Honda			
Perforage	11-29	74,1	61,0
Revison et perforage	02-50		59,7
Revison	05-76	69,8	64,0
Revison	03-81	69,8	65,5
36 Marrufo			
Perforage	07-50	99,1	21,9
Révision et perforage	04-71	190,5	27,4
Révision	07-76	182,9	18,3
37 La Mesa			
Perforage	05-69	129,8	102,7
Révision	07-75	121,9	105,2
Révision	10-75	123,4	105,2
38 Mezquite			
Perforage	07-56	61,0	27,4
Révision	08-72	59,7	36,6
Révision	06-80	57,6	41,8

Annexe XII.2. Suite

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
39 Mundito #2	03-49	153,9	109,1
40 Mundito #3	10-64	137,5	103,6
41 Mota			
Perforage	06-51	103,6	93,3
Révision et perforage	01-65	133,5	94,8
Révision	06-87	125,0	
Révision	05-97	129,5	94,8
42 Muerto Grande #2			
Perforage	07-29	90,2	12,2
43 Nava			
Perforage	02-30	61,9	19,5
Révision et perforage	12-49	61,9	
44 Novlos			
Perforage	12-28	28,7	18,3
Révision	07-74	27,7	10,7
Révision	03-80	27,7	10,7
Révision	06-89	27,1	14,0
45 Pajaritos			
Perforage	01-24	88,1	22,3
Révision	02-72	47,9	20,7
Révision	12-76	83,5	22,3
Révision et perforage	08-73	91,4	25,0
46 Palo Blanco			
Perforage	03-25	41,8	4,3
Révision	02-66	37,8	18,0
Révision et perforage	05-72	61,0	21,9
47 Peñasco			
Perforage	05-25	64,0	36,9
Révision et perforage	12-76	91,4	32,0
Révision	09-79	73,2	34,7
48 Romeral			
Perforage	05-69	128,6	100,6
49 Ruslas #1			
Perforage	02-24	31,1	12,2
Révision	09-33	28,7	20,1
Révision et perforage	05-50	47,5	28,7
Révision	06-70	47,2	29,9
Révision et perforage	03-74	76,2	29,0
Révision	12-77	77,4	32,6
Révision	02-78	64,6	32,6
50 Salinoso			
Perforage	10-51	88,7	62,5

Annexe XII.2. Suite

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
51 San Antonio			
Perforage	02-70	154,2	100,9
52 San Felipe			
Perforage	08-29	41,1	
Révision et perforage	03-61	61,0	27,4
Révision	12-72	31,1	21,3
Révision et perforage	09-73	61,0	21,3
53 San Jose #2			
Perforage	07-67	59,4	11,6
Révision	04-72	50,3	17,7
Révision	08-73	49,4	18,3
Révision et perforage	06-76	47,5	22,3
Révision et perforage	11-76	91,4	14,0
Révision	06-84	85,3	18,3
54 San Jose			
Perforage	02-50	65,5	14,9
Révision	03-67	67,1	24,1
55 San Miguel			
Perforage	06-69	240,8	182,9
Révision	11-76	230,7	201,2
Révision et perforage	12-76	237,7	201,2
56 San Marcos			
Perforage	12-29	27,4	14,0
Révision et perforage	06-64	45,7	17,1
Révision	12-70	45,7	29,6
Révision	06-80	45,7	32,6
Révision	08-81	44,2	32,0
Révision et perforage	07-83	81,4	21,9
Révision	06-98	71,0	14,0
57 San Simon			
Perforage	09-29	44,2	38,1
Révision	10-35	44,2	39,0
Révision	07-45	44,2	39,0
Révision et perforage	12-77	70,7	24,1
58 Sauces de Marín			
Perforage	12-29	52,7	5,5
Révision	06-48	50,0	8,2
Révision	08-71	48,2	10,4
Révision	05-59	48,2	
59 Saucito			
Perforage	02-69	75,6	47,2
Révision	10-74	75,6	45,4
Révision	12-77	75,6	49,4
Révision	06-82	65,5	54,9
Révision et perforage	05-83	79,2	32,0

Annexe XII.2. Suite.

Nombre et activités réalisées dans les forages	Date	Profondeur (m)	Niveau statique de l'eau (m)
60 Sauz Mocho			
Perforage	08-29	10,7	6,1
Révision et perforage	03-57	21,3	9,1
Révision et perforage	10-77	25,9	6,1
61 Tepetate			
Perforage	03-30	20,4	7,9
Révision et perforage	01-63	38,1	7,9
Révision	11-71	36,3	7,3
Révision	07-72	36,6	7,9
Révision et perforage	08-73	61,0	7,6
Révision	06-76	57,9	9,1
Révision	08-76	53,9	8,5
62 Triunfo			
Perforage	05-50	69,2	16,5
Révision et perforage	08-68	152,4	29,0
Révision	08-71	121,3	24,4
Révision et perforage	07-59	69,2	
63 Triunfo #2			
Perforage	12-66	213,4	24,4
64 Vaqueros			
Perforage	01-29	4,0	1,8
Révision	04-65	16,8	5,2
Révision	01-77	16,5	5,5
65 Yerbanis			
Perforage	01-58	22,9	16,8
Révision et perforage	12-77	35,1	20,4
66 Encinos			
67 Natera			
68 Doña Beatriz			
69 Carbonerillas			

Annexe XII.3. Réseau de distribution du ranch Atotonilco.

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
Sauz Mocho Diesel	Hagobuches	Benjamin Argumedo El Peñuelas San Bartolo El Tarai Las Cabras El Felino El Apache El Gallo El Laurel El Norteño La Mula El Baral La Campana
	Sauz Mocho	
Loma Alta Pompe éolienne / diesel	Coronela	El Soldado El Capitán El Mayor El Teniente La Bruja El Rey Bayo
Centinela	Centinela	
Agua Nueva	Aguanueva	El Michis El Gato El Uña de Gato Raspón El Maguey
El Saucito Eolienne	El Saucito	
El Divisadero Eolienne	Divisadero	Halcones El Tigre La Valentina Juan Aldama Zacatecas El Ranchero
Bordo Sauz Mocho Alacran	El Alacran	La Arafia El Escorpión El Potrillo Los Venados
Aviacion Pompe / électrique	Las Albercas	Tarjeas de los Alamos Los Alamos Tarjeas de las Yeguas La Escondida El Paso de la Cruz El Molino El Macho Pingo El Huevo El Duende El Pobre El Metate
Peñasco Eolienne	Peñasco	Tarjeas El Peñasco El Quelite El Pastelero

Annexe XII.3. Suite

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
Natera Diesel / éolienne	Natera	El Gavilan Guamales El Pavo Registrillo La Gloria Pugatorio El Elefante El Mamut Registrillo Toyona Registrillo El Dolar El Prieto
El Cardonal Diesel	Cardonal Pancho Villa	Arrastradero El Nopal El Cuevo El Hormiguero El Ambicioso El Durazno San Juan El Pepino El Jabali La Rabona Puerto Rico El Cordobez
Gachupin Eolienne	Gachupin	Milagro Gachupa
Majada Honda Eolienne	Majada Honda	
Romeral Eolienne	Romeral	Zorrillo El Pirul
Los Angeles Eolienne	Los Angeles	
San José Eolienne	San Jose	Pepito
San Simón Diesel / éolienne	Desengaño San Simon Montana	Juan Manuel El Perico Tarjeas La Noria de Rojas El Casino El Perdido
San Felipe Eolienne	San Felipe	El Capiro La Changa
León Eolienne	Leon	El Santana Gacela El Galeno Piedras Negras El Chango

Annexe XII.3. Suite

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
La Carreta Diesel / éolienne	La Carreta	El Macho La Mula El Bajío Las Maravillas Lagunilla El de Enmedio El de Abajo La Jerga El Viborillas El Cascabel La Vibora La Mielera
Liebres \ Diesel La Carrera	Las Liebres	-> La Carrera El Correcaminos Los Berrendos La Puntada El Comanche El Tarahumara Yaki Chaparral San Luis Potosí Nopal El Jinete
Dofia Beatriz Pompe / électrique	Dofia Beatriz	Temasachic ->Juana Gallo Buena Vista Trueno Dorado Mano Negra Chivo Jicote Salto Ojo de Vidro Felipe Reyes Registrillo Los Reyes ->Maria Cristina -> Registrillo Valentín de la Sierra Benito Canales Pila Vieja Registrillo Rincón del Burro Tres Bolas Heraclio Bernal San Valentín ->El 14 Cristero

Annexe XII.3. Suite

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
El Congo Diesel / éolienne	El Congo	Tanque Rojo El 3 Piedras El Rocio El Toro Palomo
Ceja Prieta Eolienne	Ceja Prieta El Centavito	
El Tepetate Eolienne	El Tepetate	La Batalla
El Francés Eolienne	El Frances La Reina	El Cabo Cuarto Tropezón
Pancho Gómez Eolienne	Pancho Gomez	
El Triunfo Eolienne	El Triunfo	
Rusias Eolienne	Rusias	
Nova Eolienne	Nova El Rey	
Corrales Diesel	Corrales Satanas	El Difunto El Duque El Canguro La Paz El Gabacho El Tijuana El Ausente La Ensenada Puerto Vallarta La Sirena Cometa Bestia El Solitario El Respingo El Acapulco El Pulpo La Mojonera
El Muerto Eolienne	El Muerto	Chihuahuailla El Texano
Palo Blanco Eolienne / diesel	Palo Blanco	Los Gansos El Halcon El Cadaver
California Eolienne	California	
Don Cruz Eolienne	Don Cruz	

Annexe XII.3. Suite

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
El Mezquite Diesel	La Escondida El Mezquite	Tarjeas El Mezquite Registrillo El Rifle El Tullido La Gaviota 2 Arbolitos Los Cisnes La Batalla Camino Real Los Patos El Pleito La Caldera El Salvaje Las Aguilas
San Antonio Diesel	San Antonio	El Gallo La Yerba El Bajío Las Palmas La Cantera El Pajarito Registro Cuadrado El Navajo Los Lobos El Cuervo - El Chanate Los Canarios El Perico El Tenzontle El Petate Registro Sacramento El 7 Copas
San Jose Diesel / éolienne	San Jose	Hiroshima El Comanche El Remache Nagasaki
Pajaritos Eolienne	Pajaritos	La Virgen -
La Bota Diesel	La Bota La Capsula	El Charro Rosario El Laurel El Condor
Coyotes Eolienne	Coyotes	- Jacal Ceja de Luna
Adjuntas Eolienne	Adjuntas	Pastoria

Annexe XII.3. Suite

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
Cajon de Saucillo Eolienne	Cajon Saucillo	
Marrufo Eolienne	Marrufo	El Pajonal El Huizachal
San Miguel Diesel	San Miguel	El Santos Juan Colorado Juan Charrasquiado La Joya
Ladrillo Eolienne	Los Ladrillos	
La Carroza (Sans équipe)	La Carroza	
Calabazas Diesel / éolienne	Calabazas	Guacal Las Palmas Lazaro Cardenas La Sombra Venustiano Carranza
Aguajito Eolienne	Aguajito Guajolota	
Jarrillas Diesel / éolienne	Jarrillas	El Escalón La Averiguación La Silla La Correa Larción El Venado La Semilla El Coyame El Guarichi Cuatro Milpas
	Pila de Indios	
Sauces de Marín Diesel / éolienne	Sauces de Marín	El Gavilan El Comisario El Sheriff La Escondida El Caporal
El Salinoso Diesel / éolienne	El Salinoso	Cerro Gordo Oculla Cuencame Sarpazo El Cardenches El Mecate
	La Lioncita	
Source Moctezuma		Potro Pinto Cruz Diablo Ponciano

Annexe XII.3. Suite

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
Mundito Diesel / éolienne	Mundito	La Tijera Marritos Cerro Viejo Rifle Marranitos Romerillo Torunos El Tizón El Revolucionario Carranza El Tachuelo Calixto Contreras El Jabali
Los Encinos Diesel	Los Encinos	Zorro La Loma Gato Tarjeas de Encinos Tarjeas de San Antonio El Búfalo El Zorritos Tarjeas de Macho Grande El Tanque El Ardillón El tejón El Tlacuahce El Conejo La Zorra Registro
Novios Diesel	Novios Rayo Empachado Morillos	El Miguelazo Fco. Zarco El Castillo Moquete Presidente La Palma calda El Media Noche Cerrito Prieto ->La Colorada El Queso El Cholula El 4 Caminos La Cueva El Albur El Jerónimo
San Marcos Diesel / éolienne / presión	San Marcos Pila de Saucillo Pila Cuadrada	Las Golondrinas Tarjeas La Estancia Los Toros Tarjeas Cerritos Prietos
Calderona Diesel / éolienne	Calderona	Tarjeas La Cebada La Llorona El 2 Negro Tarjeas de Embarque Gde. El Potrillo
Yerbanis Diesel / éolienne	Yerbanis	Tarjeas Yerbanis La Cama de Piedra La Yegua Colorada El 7 Leguas

Annexe XII.3. Suite.

Forage et son équipement	Nom du réservoir	Abreuvoir alimenté
Carbonerillas Eolienne	Secundino Gómez	La Camelia -> Del Sol Peso sobre Peso La Majada Caminos de Durango La Borreguita El Secreto Chupadero El Palomino El Porfirio El Campéon El Ojitos
Carboneras Manantial	Carboneras	-> Del Sol -> Los Compadres Los Mimbres Los Tecolotes La Cueva de Majoma El Piloncillo La Manuela Pascual OroSCO
El Herradero Eolienne	El Herradero	
Vaqueros Diesel / éolienne	Vaqueros La Cucaracha	La Tumba 5 de Mayo Peñitas El Milano
La Mota	La Mota	
Jaralito de la Zorra		
La Mesa		
Casa Grande		
Charcas de las Liebres		

Résumé

Dans une région semi-aride du Nord-Mexique, le principal objectif de ce travail de thèse est d'analyser le fonctionnement de petites retenues (*presones*) et d'établir quel pourrait être leur rôle dans un système d'exploitation orienté vers l'élevage extensif bien maîtrisé par une gestion rationnelle des pâturages. Le ranch Atotonilco, d'une superficie de 450 km², correspond bien à ce type de système d'exploitation. Il est situé dans la partie médiane de la région hydrologique 36 (RH36), sur le grand bassin versant endoréique du Rio Nazas, dans une zone montagneuse entre 1800 et 2400 m d'altitude où la précipitation moyenne annuelle est de 450 mm et la saison pluvieuse principalement estivale. Pour maîtriser la gestion des pâturages et abreuver le bétail en lui évitant de trop longs déplacements, un important équipement a été installé dès le début des années 20. Pour la maîtrise des pâturages, le dispositif comprend actuellement 102 enclos. Il permet une charge animale de près de 4500 têtes de bétail (1 UA pour 10 ha). Pour abreuver les animaux, 69 forages, 300 abreuvoirs et 61 petites retenues ont été installés.

Les observations, faites sur une période de cinq ans avec un réseau de 30 postes pluviométriques répartis sur l'ensemble du ranch et sur une période de trois ans sur 7 bassins versants représentatifs des différents types de matériaux géologiques, ont permis de dégager les principales caractéristiques hydropluviométriques de cette région. Pour 100 m de dénivelée, un accroissement annuel moyen de 30 mm, combiné à une augmentation de 5 jours de pluie, caractérise les pluies annuelles. D'après les enregistrements pluviographiques, plus de 70 % du total d'une averse estivale tombe en 30 minutes et l'analyse spatiale des précipitations révèle que la taille des cellules pluvieuses estivales varie de quelques km² à plusieurs dizaines de km². Les plus grandes couvrent la totalité du ranch.

Les 7 bassins versants étudiés, dont la superficie est comprise entre 0,1 et 5 km², présentent des coefficients annuels d'écoulement très variables et très faibles pour l'année 1996, légèrement supérieure à la médiane : 2 à 3,5 % sur matériaux calcaires, rhyolitiques ou colluviaux et moins de 0,5 % sur les basaltes et conglomérats basaltiques. A l'échelle des événements pluvieux, l'analyse des relations entre les lames ruisselées et les variables pluviométriques montre très nettement le rôle de l'intensité des pluies dans la genèse du ruissellement, ce qui nous a conduit à définir comme principale variable explicative la pluie utile (PUIL) à partir d'un seuil d'intensité de pluie (IL), fonction exponentielle décroissante d'un indice des pluies antérieures (IK). Le modèle hydrologique retenu pour reconstituer les lames ruisselées est un modèle global déterministe quadratique à 5 paramètres. L'emploi de ce modèle nous a permis de reconstituer 13 années d'apports sur trois bassins versants en utilisant la série des pluies journalières observées à Atotonilco (1971-1983) et les caractéristiques pluviométriques régionales. Une analyse en composantes principales (ACP) des variables descriptives des 7 bassins versants et des 5 paramètres hydropluviométriques associés au modèle quadratique nous a conduit à l'établissement d'une typologie hydrologique des bassins. Le croisement de cette typologie avec celle des 61 bassins versants équipés de petites retenues a permis la définition des règles d'une transposition du modèle quadratique à l'ensemble du ranch.

Les études emmenées sur l'ensemble du système de distribution de l'eau montre que l'eau des retenues est, dans la situation actuelle, très peu utilisée par le bétail. Seul un pourcentage égal à 1,26 % du volume stocké a servi, sur les années 1996 et 1997, à l'abreuvement des animaux. La durée de séjour de l'eau dans les retenues est très courte : 5 à 8 mois en 1996, année légèrement supérieure à la médiane. Même avec un abreuvement in situ les retenues ne peuvent donc servir tout au long de l'année. Diverses modifications sont proposées pour favoriser l'utilisation de l'eau des *presones*, ce qui permettrait d'importantes économies de carburant, celui-ci étant utilisé pour l'exhaure des eaux souterraines. La plus importante de ces modifications consiste à connecter les retenues au réseau de distribution de l'eau dans une partie des 280 abreuvoirs, les autres concernent le surcreusement et l'imperméabilisation des cuvettes. Ces améliorations sont testées, sur plusieurs exemples, dans leurs effets sur la gestion des eaux du ranch.

Mots clés : gestion de l'eau, petits barrages, modèle hydrologique global, région semi-aride, Mexique.