

COMMUNAUTE FRANÇAISE DE BELGIQUE  
ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-EUROPE  
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLoux

**ALLOCATION, MODELISATION ET VALORISATION DES  
RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE  
TOLOMOSA (BOLIVIE)**

Claude de PATOUL

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques  
et ingénierie biologique

Co-Promotrice: Dr A. Degré, Première Assistante

Co-Promoteur: Prof. D. Xanthoulis

2008



de PATOUL Claude, [2008]. Allocation, modélisation et valorisation des ressources en eau du bassin versant de la rivière Tolomosa (Bolivie). Thèse de doctorat. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 283 p., 146 tabl., 134 fig.

---

**Résumé.** L'objectif de la thèse vise à estimer les termes du bilan en eau du bassin de la Tolomosa par le modèle semi-distribué SWAT (Soil and Water Assessment Tool) couplé au SIG ArcView, en vue d'établir, analyser et comparer la réponse hydrologique du bassin face aux changements biophysiques lors de l'application d'un scénario de développement pour, à terme, allouer et quantifier la valeur unitaire du bien « eau » en relation avec la production économique du bassin. La méthodologie comprend la révision de la littérature scientifique pertinente et combine les sciences naturelles et les études de terrain avec les techniques de télédétection (image Landsat 5TM 1997), de modélisation hydrologique et de valorisation économique. Des six modélisations hydrologiques conclues, l'analyse des performances et des incertitudes associées aux résultats montre que TOLOHRU, qui possède le découpage spatial le plus fin, présente la meilleure robustesse qui permet d'espérer une bonne connaissance de la réaction hydrologique du bassin en fonction d'une pluviométrie identifiée. Trois scénarios productifs de développement sont envisagés. Les résultats de la forme fonctionnelle du prix hédonique de quatre-vingt-sept propriétés agricoles écartent le scénario de production agricole. Seul le scénario mixte sylvo-pastoral est retenu, l'élevage étant intrinsèquement lié à toutes les activités du bassin. Enfin, la valorisation de l'eau est déterminée en comparant la variation du bilan en eau et de l'écoulement total atteignant le réservoir avec la différence de la valeur actualisée de la production du bassin sur une période de 30 ans entre les cas suivants: (1) Situation actuelle avec une valeur actualisée de la production annuelle agricole, pastorale et hydroélectrique estimée à 59,1 millions USD; (2) Scénario sylvo-pastoral avec une valeur actualisée de la production annuelle sylvo-pastorale et hydroélectrique de 74,3 millions USD. En termes unitaires, le rapport entre la différence de la valeur de la production en USD et celle de l'écoulement total à l'exutoire en mètres cubes correspond à une valeur relative de 0,31 USD du mètre cube d'eau, fonction des hypothèses considérées par cette étude. En plus des résultats obtenus, nous avons l'espoir que cette démarche soit considérée par les décideurs régionaux y compris ceux du projet Contrat Rivière Tolomosa (CRT) comme un outil de gestion disponible permettant d'appuyer le développement d'une politique rationnelle, soutenable et économiquement viable des ressources hydriques d'un bassin versant.

de PATOUL Claude, [2008]. Allocation, modelling and valuation of the Tolomosa watershed water resources (Bolivia). PhD thesis (in French). Gembloux Agricultural University (Belgium), 283 p., 146 tabl., 134 fig.

---

**Abstract.** The objective of this PhD research is to simulate the water balance of the Tolomosa watershed, using the physically based GIS (ArcView) linked software package SWAT (Soil and Water Assessment Tool), as part of the evaluation of the hydrological response to development scenarios in allocating available water resources and quantifying the value in relation to the economic production of the basin. The methodology includes the review of the relevant scientific articles and combines natural sciences and field surveys with remote sensing techniques (1997 Landsat 5TM imagery), hydrological modelling and water valuation. Out of the six conducted modellings, the assessment of the predictions and uncertainties associated with the results indicates that TOLOHRU, which has the finest spatial discretisation, shows the best performance for the hydrological simulation of the basin. Three development scenarios of the basin are considered. The results of the functional form of the hedonic property pricing of eighty seven agricultural plots draw aside the agricultural scenario. Only the mixed sylvo-pastoral scenario is considered, cattle breeding being related to all the activities of the basin. The water valuation is estimated by comparing the changes between the total flow reaching the storage reservoir and the value of the watershed production of a 30 year period in the case of: (1) Current situation with an estimated agriculture, pastoral and hydroelectric annual production of 59.1 million USD (constant price); (2) Forestry-cattle breeding scenario contributes to a forestry-cattle breeding and hydroelectric production of 74.3 million USD (constant price). In unit terms, a cubic meter of water has a relative value of 0.31 USD which depends of the hypothesis of this research. Furthermore, we hope that this approach will be considered by the regional decision makers, including those of the Tolomosa River Contract (TRC) project, as an effective management tool for developing sustainable river basin water resources policy.

de PATOUL Claude, [2008]. Asignación, modelación y valoración de los recursos hídricos de la cuenca del río Tolomosa (Bolivia). Tesis de doctorado (en francés). Universidad Agrícola de Gembloux (Bélgica), 283 p., 146 cuad., 134 fig.

---

**Resumen.** Esta tesis estima mediante el uso del modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool) acoplado al SIG ArcView los parámetros del balance hídrico de la cuenca del Tolomosa como parte de la evaluación de la respuesta hidrológica del impacto de escenarios de desarrollo en la asignación de los recursos hídricos disponibles y la cuantificación del valor del agua en base a la producción económica generada dentro de la cuenca. La metodología incluye la compilación de los artículos científicos relevantes y combina las ciencias naturales y los estudios de campo con las técnicas de teledetección (imagen Landsat 5TM 1977), de modelación hidrológica y valoración económica. De las seis modelaciones conducidas, el análisis de los resultados e incertidumbres asociadas demuestra que TOLOHRU, con la discretización espacial la más fina, tiene el mejor funcionamiento en la simulación de los sistemas hidrológicos de la cuenca. Se consideran tres escenarios de desarrollo productivo en la cuenca. Los resultados de la forma funcional del precio hedónico de ochenta y siete terrenos agrícolas (once variables explicativas) descartan el escenario únicamente agrícola. Solamente se considera el sistema productivo mixto silvo-pastoril, la ganadería siendo intrínsecamente vinculada a todas las actividades de la cuenca. La valoración del agua se determina en función de los cambios en el flujo total de agua alcanzando el reservorio y del valor de la producción de la cuenca en un periodo de 30 años en los dos casos: (1) Situación actual (parámetros del balance hídrico estimados mediante TOLOHRU) con un valor actualizado de la producción agrícola, pastoril e hidroeléctrica anual estimado a 59,1 millones de USD; (2) Escenario silvo-pastoril (parámetros del balance hídrico estimados mediante HRUFOR) con un valor actualizado de la producción silvo-pastoril e hidroeléctrica estimado a 74,3 millones de USD. En términos unitarios, un metro cúbico de agua corresponde a un valor relativo de 0,31 USD, dependiendo de las hipótesis de esta investigación. Además de los resultados logrados, esperamos que esta metodología sea considerada como una herramienta de trabajo por los organismos regionales decidores incluyendo el proyecto Contrato de Río Tolomosa (CRT) para la gestión sostenible de los recursos hídricos de una cuenca.

COPYRIGHT © 2008. Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994 sur le droit d'auteur, seul l'auteur a le droit de reproduire cet ouvrage ou d'en autoriser la reproduction de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation avec la loi.

# REMERCIEMENTS

Phase importante que celle de la rédaction des remerciements, car il symbolise l'aboutissement des travaux.

Aussi, je remercie tous ceux qui m'ont permis d'atteindre ce moment.

Je remercie tout d'abord Mme le Professeur Dautrebande, promotrice de cette thèse jusqu'à sa retraite, qui, en accueillant l'idée de ce travail, m'a permis de le réaliser dans de très bonnes conditions, malgré une distance géographique certaine. Ces remerciements s'adressent aussi au Professeur Xanthoulis et à Mme Degré, 1re Assistante, qui ont repris la promotion de cette thèse.

Mr le Recteur Thewis, Président du jury, ainsi que ceux qui ont accepté d'être membres de ma commission, les Professeurs Bock, Debouche, Lebailly, Mergeai et Mr Castaigne, consultant indépendant. Je les remercie des questions et remarques que leur a inspirées ce travail et qui témoignent de l'intérêt qu'ils y ont porté.

Olivier Debauche a accompagné ma découverte du modèle hydrologique SWAT; son aide et sa disponibilité m'ont été très utiles. Vincenzo Verardi m'a guidé avec beaucoup de professionnalisme dans les labyrinthes de la statistique.

Mes pensées vont aussi à tous mes collègues boliviens de l'Institut Interuniversitaire Bolivien des Ressources Hydriques (INIBREH), dont ceux qui m'ont accompagné sur le terrain, me permettant de mieux connaître ses habitants, sa physiographie et son histoire.

Merci enfin à mes parents et, très profondément, à mon épouse qui m'ont permis d'arriver là où je suis maintenant.



# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION GENERALE

1.	CADRE DE L'ETUDE .....	3
2.	LE BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA .....	3
3.	OBJECTIF .....	5
4.	DEMARCHE .....	5

## PREMIERE PARTIE: CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

I-1	BASE DE DONNEES .....	9
I-1.1	SOURCES PRINCIPALES .....	9
I-1.2	SYSTEME DE REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE.....	10
I-1.3	IMAGE SATELLITAIRE .....	11
I-1.4	TRAITEMENT DES DONNEES.....	12
I-2	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT .....	13
I-2.1	CARTES THEMATIQUES .....	13
I-2.2	CARTE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	14
I-2.3	CARTE GEOLOGIQUE .....	14
I-2.4	CARTE GEOMORPHOLOGIQUE .....	18
I-2.5	CARTE DES SOLS.....	25
I-2.6	CARTE DES ETAGES ECOLOGIQUES.....	29
I-2.7	CARTE DU DEGRE D'EROSION.....	31
I-2.8	CARTE DE L'OCCUPATION DES TERRES.....	34

## DEUXIEME PARTIE: MODELE HYDROLOGIQUE ET BASE DE DONNEES

II-1	CYCLE DE L'EAU.....	39
II-2	LE MODELE HYDROLOGIQUE.....	40
II-2.1	CHOIX DU MODELE.....	40
II-2.2	MODELE SWAT.....	42
II-2.3	SPATIALISATION.....	43
II-2.4	FONCTIONS DE PRODUCTION DES FLUX D'EAU.....	44
II-2.4.1	FLUX VERTICAUX.....	44
II-2.4.2	FLUX LATERAUX.....	47
II-2.5	FONCTION DE TRANSFERT DES FLUX D'EAU.....	53
II-2.5.1	CHEMINEMENT DE L'EAU DANS LE SOUS-BASSIN.....	53
II-2.5.2	CHEMINEMENT DE L'EAU DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	54
II-2.6	CROISSANCE DU COUVERT VEGETAL.....	55
II-2.7	GENERATEUR CLIMATIQUE.....	55
II-2.8	RENDEMENT EN SEDIMENT.....	55
II-2.8.1	PROCESSUS EROSIF.....	55
II-2.8.2	MODELISATION DE LA PRODUCTION DE SEDIMENTS.....	56
II-3	SIMULATION DU BILAN EN EAU.....	57
II-3.1	REVISION BIBLIOGRAPHIQUE.....	57
II-3.2	DISCRETISATION SPATIALE ET TEMPORELLE.....	57
II-3.3	ANALYSE DE SENSIBILITE.....	58
II-3.4	CALIBRAGE ET VALIDATION.....	58
II-3.4.1	PHASE DE CALIBRAGE.....	58
II-3.4.2	PHASE DE VALIDATION.....	59
II-3.5	EVALUATION DES PERFORMANCES DU MODELE.....	59
II-3.5.1	CRITERES DE PERFORMANCE.....	60
II-3.5.2	BILANS MENSUELS, ANNUELS ET INTERANNUELS.....	62
II-3.6	RENDEMENT EN SEDIMENT.....	62
II-4	BASES DE DONNEES COMPLEMENTAIRES.....	62
II-4.1	DONNEES DEBIMETRIQUES.....	63
II-4.1.1	DISPONIBILITE SPATIALE.....	63
II-4.1.2	DISPONIBILITE TEMPORELLE.....	63
II-4.1.3	QUALITE DES DONNEES.....	63
II-4.2	DONNEES METEOROLOGIQUES.....	63
II-4.2.1	INTRODUCTION.....	63
II-4.2.2	ANALYSE PLUVIOMETRIQUE.....	69
II-4.2.3	ANALYSE DES TEMPERATURES JOURNALIERES.....	75
II-4.2.4	ANALYSE DES DONNEES JOURNALIERES D'HUMIDITE RELATIVE.....	76
II-4.2.5	ANALYSE DE LA RADIATION SOLAIRE JOURNALIERE.....	77
II-4.3	MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	79
II-4.3.1	CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	79
II-4.3.2	VALIDATION.....	79
II-4.4	DONNEES CARTOGRAPHIQUES.....	80
II-4.4.1	CARTE D'OCCUPATION DES TERRES.....	80
II-4.4.2	CARTE DES SOLS.....	84
II-4.4.3	DONNEES ANNEXES.....	89
II-4.5	SEDIMENTATION DU RESERVOIR.....	89
II-5	CONCLUSIONS.....	91

## TROISIEME PARTIE: MODELISATION DU BILAN EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

III-1 DISCRETISATION SPATIALE DU BASSIN VERSANT .....	95
III-1.1 SOUS-BASSINS.....	95
III-1.2 CARTE DES SOUS-BASSINS ET RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	97
III-2 JUSTIFICATION DES MODELISATIONS DU BILAN HYDRIQUE .....	97
III-3 ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES .....	99
III-3.1 PARAMETRE ESCO .....	100
III-3.2 PARAMETRE EPCO .....	102
III-3.3 PARAMETRE GW_REVAP .....	103
III-3.4 PARAMETRE REVAPMN .....	103
III-3.5 PARAMETRE SLSUBBSN .....	104
III-3.6 PARAMETRE GW_DELAY .....	104
III-3.7 PARAMETRE ALPHA_BF .....	105
III-3.8 PARAMETRE GWQMN.....	105
III-3.9 PARAMETRE LAT_TTIME .....	106
III-3.10 CONCLUSIONS .....	106
III-4 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLOFI.....	107
III-4.1 DISCRETISATION TEMPORELLE .....	107
III-4.2 DISCRETISATION SPATIALE .....	107
III-4.3 PHASE DE CALIBRAGE .....	108
III-4.3.1 VALEUR DES PARAMETRES.....	108
III-4.3.2 CRITERES STATISTIQUES .....	109
III-4.3.3 RESULTATS DE LA PHASE DE CALIBRAGE.....	111
III-4.3.4 EVALUATION DES PERFORMANCES DU CALIBRAGE.....	112
III-4.4 PHASE DE VALIDATION .....	121
III-4.4.1 CRITERES STATISTIQUES .....	121
III-4.4.2 RESULTATS DE LA PHASE DE VALIDATION.....	122
III-4.4.3 EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA VALIDATION.....	123
III-4.5 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION .....	131
III-4.5.1 BILAN HYDROLOGIQUE.....	131
III-4.5.2 HYDROGRAMMES ANNUELS.....	132
III-4.5.3 HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES DES	
ECOULEMENTS.....	133
III-4.5.4 DEBITS CLASSES.....	133
III-4.6 RENDEMENT EN SEDIMENT .....	142
III-4.7 CONCLUSIONS DE LA MODELISATION .....	143
III-5 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLOMAT .....	143
III-5.1 PARAMETRE CN.....	143
III-5.2 VALEURS DES PARAMETRES.....	146
III-5.3 CRITERES STATISTIQUES .....	146
III-5.4 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION .....	147
III-5.4.1 BILAN HYDROLOGIQUE.....	147
III-5.4.2 HYDROGRAMMES ANNUELS.....	149
III-5.4.3 HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES DES	
ECOULEMENTS.....	149
III-5.4.4 HYDROGRAMMES DES ECOULEMENTS JOURNALIERS .....	149
III-5.5 RENDEMENT EN SEDIMENT .....	150
III-5.6 CONCLUSIONS DE LA MODELISATION .....	154
III-6 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLO3A.....	154
III-6.1 DISCRETISATION TEMPORELLE .....	154
III-6.2 DISCRETISATION SPATIALE .....	154
III-6.3 PHASE DE CALIBRAGE .....	154
III-6.3.1 VALEURS DES PARAMETRES .....	154
III-6.3.2 CRITERES STATISTIQUES .....	155
III-6.3.3 RESULTATS DE LA PHASE DE CALIBRAGE.....	157
III-6.3.4 EVALUATION DES PERFORMANCES DU CALIBRAGE.....	158
III-6.4 PHASE DE VALIDATION .....	162
III-6.4.1 CRITERES STATISTIQUES .....	162

III-6.4.2	RESULTATS DE LA PHASE DE VALIDATION .....	163
III-6.4.3	EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA VALIDATION.....	164
III-6.5	ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION .....	169
III-6.5.1	BILAN HYDROLOGIQUE.....	169
III-6.5.2	HYDROGRAMMES ANNUELS.....	169
III-6.5.3	HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES DES ÉCOULEMENTS .....	170
III-6.5.4	COURBES ANNUELLES DES DEBITS CLASSES.....	170
III-6.6	RENDEMENT EN SEDIMENT .....	175
III-6.7	CONCLUSIONS DE LA MODELISATION .....	175
III-7	MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLOHRU .....	175
III-7.1	DISCRETISATION SPATIALE .....	176
III-7.2	PHASE DE CALIBRAGE .....	178
III-7.2.1	VALEUR DES PARAMETRES.....	178
III-7.2.2	CRITERES STATISTIQUES .....	178
III-7.2.3	RESULTATS DE LA PHASE DE CALIBRAGE.....	180
III-7.2.4	EVALUATION DES PERFORMANCES DU CALIBRAGE.....	181
III-7.3	PHASE DE VALIDATION .....	185
III-7.3.1	CRITERES STATISTIQUES .....	185
III-7.3.2	RESULTATS DE LA PHASE DE VALIDATION .....	186
III-7.3.3	EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA VALIDATION.....	187
III-7.4	ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION .....	191
III-7.4.1	BILAN HYDROLOGIQUE.....	191
III-7.4.2	HYDROGRAMMES ANNUELS.....	191
III-7.5	RENDEMENT EN SEDIMENT .....	194
III-7.6	CONCLUSIONS DE LA MODELISATION .....	194
III-8	DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	195
III-8.1	CURVE NUMBER .....	195
III-8.2	DONNEES CLIMATIQUES .....	195
III-8.3	PARAMETRES DU MODELE .....	195
III-8.4	CRITERES STATISTIQUES .....	196
III-8.5	TERMES DU BILAN EN EAU.....	197
III-8.6	HYDROGRAMMES ANNUELS ET MENSUELS .....	197
III-8.7	HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES .....	199
III-8.8	RENDEMENT EN SEDIMENT .....	201

**QUATRIEME PARTIE: ALLOCATION ET VALORISATION DES RESSOURCES HYDRIQUES DE  
SCENARIOS DE DEVELOPPEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE TOLOMOSA**

IV-1	TECHNIQUES DE VALORISATION .....	205
IV-1.1	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....	205
IV-1.2	METHODOLOGIE .....	205
IV-1.3	EFFET SUR LE BILAN EN EAU.....	206
IV-1.4	TECHNIQUES D'APPROXIMATION.....	207
IV-1.4.1	FONCTION HEDONIQUE.....	207
IV-1.4.2	FONCTION DE PRODUCTION .....	208
IV-1.5	CHOIX DU LOGICIEL D'ANALYSE ECONOMETRIQUE .....	209
IV-2	BASE DE DONNEES COMPLEMENTAIRES.....	209
IV-2.1	CARTES D'APTITUDE DES TERRES.....	209
IV-2.1.1	METHODOLOGIE .....	209
IV-2.1.2	APTITUDE DE LA TERRE .....	210
IV-2.1.3	APTITUDE AGRICOLE .....	211
IV-2.1.4	APTITUDE PASTORALE.....	211
IV-2.1.5	APTITUDE SYLVICOLE.....	212
IV-2.2	CARTE DES CLASSES DE PENTE .....	217
IV-2.3	PROPRIETES AGRICOLES.....	220
IV-2.4	PROJET MULTIPLE SAN JACINTO .....	221
IV-3	SITUATION ACTUELLE.....	225
IV-3.1	DEMOGRAPHIE ET OCCUPATION .....	225
IV-3.2	SERVICES.....	226
IV-3.3	PRODUCTION HYDROELECTRIQUE .....	226
IV-3.4	PRODUCTION AGRICOLE.....	230
IV-3.4.1	SYSTEMES DE PRODUCTION.....	230
IV-3.4.2	PRODUCTION .....	231
IV-3.5	PRODUCTION PASTORALE.....	234
IV-3.5.1	SYSTEMES DE PRODUCTION.....	234
IV-3.5.2	PRODUCTION .....	236
IV-3.6	PRODUCTION SYLVICOLE.....	237
IV-4	RESULTATS DE LA FONCTION HEDONIQUE .....	237
IV-4.1	VARIABLES EXPLICATIVES .....	237
IV-4.2	RELATION EMPIRIQUE.....	239
IV-4.3	ANALYSE DES RESULTATS.....	239
IV-4.3.1	COEFFICIENTS .....	239
IV-4.3.2	ANALYSE DES RESULTATS .....	239
IV-4.3.3	ANALYSE DE SENSIBILITE .....	243
IV-4.4	CONCLUSIONS .....	246
IV-5	SCENARIO DE DEVELOPPEMENT.....	247
IV-5.1	CHOIX DU SCENARIO .....	247
IV-5.2	PRODUCTION DU BASSIN .....	248
IV-5.2.1	TAUX D'ESCOMPTE .....	248
IV-5.2.2	PRODUCTION HYDROELECTRIQUE .....	248
IV-5.2.3	PRODUCTION AGRICOLE.....	248
IV-5.2.4	PRODUCTION PASTORALE.....	250
IV-5.2.5	PRODUCTION FORESTIERE .....	250
IV-6	BILAN EN EAU ET VALORISATION .....	255
IV-6.1	DISCRETISATION SPATIALE .....	255
IV-6.2	PHASE DE CALIBRAGE .....	256
IV-6.3	ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS.....	256
IV-6.3.1	BILAN HYDROLOGIQUE.....	260
IV-6.3.2	HYDROGRAMMES ANNUELS.....	260
IV-6.3.3	HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES D'ECOULEMENTS .....	261
IV-6.4	RENDEMENT EN SEDIMENT .....	261
IV-6.5	ALLOCATION ET VALORISATION DE L'EAU .....	263
IV-6.6	DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS.....	264
IV-6.6.1	PARAMETRE CN.....	264

IV-6.6.2	TERMES DU BILAN EN EAU .....	264
IV-6.6.3	RENDEMENT EN SEDIMENT .....	266
IV-6.6.4	EAU POTABLE.....	267
IV-6.6.5	PRODUCTION HYDROELECTRIQUE .....	267
IV-6.6.6	VALORISATION HYDRIQUE.....	267

**CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**ANNEXES**

## LISTE DES TABLEAUX

### PREMIERE PARTIE: CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

TABLEAU I-1:	paramètres de la projection locale – Bassin versant de la Tolomosa .....	10
TABLEAU I-2:	coordonnées UTM des quatre points extrêmes du bassin – Bassin de la Tolomosa. .....	10
TABLEAU I-3:	densité des observations de terrain .....	14
TABLEAU I-4:	sous-bassins et surfaces - Bassin de la Tolomosa.....	14
TABLEAU I-5:	formations géologiques (source: Suárez, 1996; GEOBOL, 1991 et 1982; Ahlfeld et al., 1960) - Bassin de la Tolomosa.....	16
TABLEAU I-6:	surface des domaines géomorphologiques (source: PEA, 2005; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001) – Bassin de la Tolomosa.....	18
TABLEAU I-7:	domaines géomorphologiques, paysages et unités géomorphologiques et superficies (ha et % du bassin) (source: PEA, 2005 ; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001) – Bassin de la Tolomosa.....	20
TABLEAU I-8:	description générale des groupes des sols (FAO, 2001) – Bassin de la Tolomosa	26
TABLEAU I-9:	unités cartographiques de la carte des sols et superficies (source: adapté de Zonisig(b), 2001 ; Espinoza, 1995) - Bassin de la Tolomosa .....	27
TABLEAU I-10:	altitude et surface en % du bassin versant des étages écologiques (source: Zonisig(b), 2001; Agrosig, 2001) – Bassin de la Tolomosa .....	29
TABLEAU I-11:	degré, forme dominante d'érosion, paysage et unité géomorphologique correspondante et surface (source: adapté de Espinoza, 2002 ; Zonisig(b), 2001)- Bassin de la Tolomosa .....	32
TABLEAU I-12:	description, superficie en hectare et en pourcentage du bassin versant des classes d'occupation des terres (source: adapté de PEA, 2004; Zonisig(b), 2001; Espinoza et al., 2001; PROBONA, 1995) - Bassin de la Tolomosa .....	35

## DEUXIEME PARTIE: MODELE HYDROLOGIQUE ET BASE DE DONNEES

TABLEAU II-1:	définition des groupes hydrologiques des sols (source: Soil Conservation Service).	49
TABLEAU II-2:	valeurs du paramètre de ruissellement CN (pente de 5 %; condition d'humidité II) (source: Chow, 1964) – Bassin de la Tolomosa	51
TABLEAU II-3:	discrétisation temporelle des périodes de simulation – Bassin de la Tolomosa	58
TABLEAU II-4:	critères statistiques utilisés pour l'analyse des résultats des modélisations – Bassin de la Tolomosa	60
TABLEAU II-5:	période de mesures disponibles de débit à l'exutoire - Bassin de la Tolomosa	63
TABLEAU II-6:	données journalières observées (1976 – 1984) à la station débitométrique de San Jacinto A sur la période de 1976 à 1984 (source: ENDE et SENAMHI) - Bassin de la Tolomosa	65
TABLEAU II-7:	types climatiques - Bassin de la rivière Tolomosa (source: PEA(a), 1998)	66
TABLEAU II-8:	stations pluviométriques et météorologiques (source: SENAMHI, 2002) - Bassin de la Tolomosa	66
TABLEAU II-9:	stations pluviométriques et météorologiques et périodes disponibles par observation (source: SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa	68
TABLEAU II-10:	précipitations mensuelles moyennes sur les périodes avec données des stations à l'intérieur du bassin (Pinos, San Andres et Calderilla) et de la station de référence (Aeropuerto) (source: adapté de SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa	68
TABLEAU II-11:	précipitations mensuelles et moyennes mensuelles sur la période de 1976 à 1984 (source: SENAMHI, 2002) - Bassin de la Tolomosa	71
TABLEAU II-12:	températures maxima mensuelles, mensuelles moyennes et déviations standards de la station météorologique Aeropuerto (1976 – 84) (adapté de SENAMHI, 2002)	76
TABLEAU II-13:	températures minima mensuelles, mensuelles moyennes et déviations standards de la station météorologique Aeropuerto (1976 – 84) (source: SENAMHI, 2002)	76
TABLEAU II-14:	humidité relative mensuelle, moyenne mensuelle et déviations standards de la station météorologique Aeropuerto (1976–84) (source: SENAMHI, 2002)	77
TABLEAU II-15:	valeurs mensuelles, moyennes mensuelles et déviations standards de la radiation solaire de la station météorologique El Tejar (1977 – 84) (source: SENAMHI, 2002)	78
TABLEAU II-16:	classe dominante d'occupation des terres et superficie (nomenclature SWAT) – Bassin de la Tolomosa	82
TABLEAU II-17:	classes d'occupation des terres et superficie par sous-bassin - Bassin de la Tolomosa	84
TABLEAU II-18:	unités pédologiques USDA et FAO et superficie, groupe hydrologique (GH) et texture correspondante - Bassin de la Tolomosa	85
TABLEAU II-19:	surface des sols dominants et groupe hydrologique - Bassin de la Tolomosa	86
TABLEAU II-20:	résultats de la campagne bathymétrique de 2004 (source: Caryglobal srl, 2004)	89
TABLEAU II-21:	comparaison des résultats des campagnes bathymétriques de 1989, 1995 et 2004 (source: Caryglobal srl, 2004)	90
TABLEAU II-22:	taille des particules (AASHTO)	91
TABLEAU II-23:	pourcentage en limon et argile, poids spécifique des solides et poids unitaire ou spécifique apparent des échantillons prélevés dans le réservoir – Bassin de la Tolomosa	91
TABLEAU II-24:	résumé des données biophysiques par sous-bassin – Bassin de la Tolomosa	92

## TROISIEME PARTIE: MODELISATION DU BILAN EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

TABLEAU III-1:	résultats de la simulation en fonction de la modification du paramètre surface seuil – Bassin de la Tolomosa.....	95
TABLEAU III-2:	résultats de la simulation en fonction du nombre de bassins versants - Bassin de la Tolomosa .....	95
TABLEAU III-3:	superficie, longueur du cours d'eau et pente moyenne par sous-bassin - Bassin de la Tolomosa .....	97
TABLEAU III-4:	résultats de l'étude de sensibilité des paramètres via le modèle TOLOSA1.....	107
TABLEAU III-5:	étapes chronologiques de la modélisation - Bassin de la Tolomosa.....	107
TABLEAU III-6:	caractéristiques des Unités de Réponse Hydrologique (HRU) dominantes de la modélisation TOLOFI – Bassin de la Tolomosa .....	108
TABLEAU III-7:	valeurs finales des paramètres de la modélisation TOLOFI obtenues par calibrage (1), des données de terrain, littérature, etc. (2) ou à partir des valeurs par défaut (3) du modèle (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa.....	109
TABLEAU III-8:	valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOFI calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa ... ..	110
TABLEAU III-9:	résultats du calibrage de la simulation TOLOFI des écoulements annuels globaux par année hydrologique pour la période 1977–81 (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa .....	112
TABLEAU III-10:	résultats du calibrage de la simulation TOLOFI des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1981 (SWAT run 6 KUL partie 2) – Bassin de la Tolomosa ..	112
TABLEAU III-11:	comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes de la simulation TOLOFI par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa .....	113
TABLEAU III-12:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa.....	114
TABLEAU III-13:	valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOFI calculées pour la phase de validation sur la période d'août 81 à juillet 84 (run 5) - Bassin de la Tolomosa .....	121
TABLEAU III-14:	résultats de la validation de la simulation TOLOFI des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période 1981–84 (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa .....	122
TABLEAU III-15:	résultats de la validation de la simulation TOLOFI des écoulements mensuels moyens sur la période de 1981 à 1984 (SWAT run 6 KUL partie 2) - Bassin de la Tolomosa ...	123
TABLEAU III-16:	comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa .....	123
TABLEAU III-17:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa.....	124
TABLEAU III-18:	résultats annuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	131
TABLEAU III-19:	résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOFI (run 6 KUL partie 2) sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa .....	131
TABLEAU III-20:	débits caractéristiques simulés annuels et d'étiage (DCE) – Bassin de la Tolomosa .....	142
TABLEAU III-21:	rendement moyen annuel en sédiment (SYLD) estimé par sous-bassin via la modélisation TOLOFI (run 6KUL, partie 2) sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa .....	142
TABLEAU III-22:	paysages, unités géomorphologiques et groupes hydrologiques correspondants (source: réunions de mars 2006) – Bassin de la Tolomosa) .....	144
TABLEAU III-23:	unité d'occupation des terres, groupe hydrologique et CN correspondant (pente de 5%; condition d'humidité II) (source: Chow, 1964) – Bassin de la Tolomosa) .....	146
TABLEAU III-24:	comparaison entre les valeurs du $CN_{2s}$ des modélisations TOLOFI (run 6KUL2) et TOLOMAT (run 15KUL2) – Bassin de la Tolomosa .....	146

TABLEAU III-25:	comparaison entre les valeurs des critères statistiques des modélisations TOLOMAT et TOLOFI calculées pour les phases de calibrage et validation sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa.....	147
TABLEAU III-26:	comparaison entre les termes annuels moyens du bilan en eau des modélisations TOLOFI et TOLOMAT sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.	147
TABLEAU III-27:	résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOMAT sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa.....	148
TABLEAU III-28:	rendement annuel moyen en sédiment SYLD estimé par sous-bassin via la modélisation TOLOMAT (run 6KUL, partie 2) sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa .....	150
TABLEAU III-29:	valeurs finales des paramètres de la modélisation TOLO3A obtenues par calibrage (1), des données de terrain (2) ou des valeurs par défaut (3) du modèle (run 98) - Bassin de la Tolomosa.....	154
TABLEAU III-30:	valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLO3A calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78 - Bassin de la Tolomosa.....	155
TABLEAU III-31:	résultats de la phase de calibrage de la simulation TOLO3A des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période 1977–78 (run 103) – Bassin de la Tolomosa .....	157
TABLEAU III-32:	résultats de la phase de calibrage de la simulation TOLO3A des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1978 (run 103) – Bassin de la Tolomosa.....	158
TABLEAU III-33:	comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par année hydrologique pour la phase de calibrage sur la période de 1977-78 – Bassin de la Tolomosa .....	158
TABLEAU III-34:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa.....	159
TABLEAU III-35:	valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLO3A calculées pour la phase de validation (run 103) - Bassin de la Tolomosa .....	162
TABLEAU III-36:	résultats de validation de la simulation via TOLO3A des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période 1978–80 (run 103) – Bassin de la Tolomosa ...	163
TABLEAU III-37:	résultats de validation de la simulation TOLO3A des écoulements mensuels moyens sur la période de 1978 à 1980 (run 103) - Bassin de la Tolomosa.....	164
TABLEAU III-38:	somme annuelle des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation .....	164
TABLEAU III-39:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa.....	165
TABLEAU III-40:	résultats annuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLO3A (run 98) sur la période de 1977 à 1980 – Bassin de la Tolomosa .....	169
TABLEAU III-41:	résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLO3A sur la période de 1977 à 1980 - Bassin de la Tolomosa .....	169
TABLEAU III-42:	débits caractéristiques simulés moyens et d'étiage (DCE) – Bassin de la Tolomosa .....	175
TABLEAU III-43:	rendement annuel moyen en sédiment SYLD estimé par sous-bassin via la modélisation TOLO3A (run 98) sur la période de 1977 à 1980 - Bassin de la Tolomosa.....	175
TABLEAU III-44:	unités d'occupation des terres et de sol (HRU) présentes par surface seuil – Bassin de la Tolomosa.....	176
TABLEAU III-45:	superficie et paramètre CN des huit HRU définies pour la modélisation TOLOHRU (run 135) – Bassin de la Tolomosa .....	177
TABLEAU III-46:	valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOHRU calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 - Bassin de la Tolomosa.....	178
TABLEAU III-47:	valeurs finales des paramètres de la modélisation TOLOHRU obtenues par calibrage (1), des données de terrain, littérature, etc. (2) ou des valeurs par défaut du logiciel (3) du modèle (run 135) - Bassin de la Tolomosa.....	179
TABLEAU III-48:	résultats du calibrage via TOLOHRU des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période de 1977 à 1981 (run 135) – Bassin de la Tolomosa.....	181
TABLEAU III-49:	résultats du calibrage via TOLOHRU des écoulements mensuels moyens globaux sur la période de 1977 à 1981 (run 135) - Bassin de la Tolomosa.....	181

TABLEAU III-50:	comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa .....	182
TABLEAU III-51:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa.....	183
TABLEAU III-52:	valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOHRU calculées pour la phase de validation sur la période d'août 1981 à juillet 1984 - Bassin de la Tolomosa..	185
TABLEAU III-53:	résultats de validation de la simulation TOLOHRU des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période de 1981 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	186
TABLEAU III-54:	résultats de validation de la simulation TOLOHRU des écoulements mensuels moyens par année hydrologique sur la période de 1981 à 1984 - Bassin de la Tolomosa .....	187
TABLEAU III-55:	comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa .....	187
TABLEAU III-56:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa.....	188
TABLEAU III-57:	résultats annuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	191
TABLEAU III-58:	résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa.....	191
TABLEAU III-59:	rendement moyen annuel en sédiment estimé par HRU via la modélisation TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa.....	194
TABLEAU III-60:	valeurs des CN des différentes modélisations des termes du bilan en eau - Bassin de la Tolomosa.....	195
TABLEAU III-61:	comparaison entre les valeurs des critères statistiques EF (Nash) et $R^2$ et de l'écart-type résiduel des modélisations TOLOFI, TOLOMAT, TOLO3A et TOLOHRU pour les phases de calibrage et validation – Bassin de la Tolomosa .....	196
TABLEAU III-62:	comparaison entre les valeurs des termes annuels moyens du bilan en eau des modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 et TOLO3A sur la période de 1977 à 1980 – Bassin de la Tolomosa.....	197
TABLEAU III-63:	comparaison entre les rendements annuels moyens en sédiment SYLD par sous-bassin et HRU simulés via TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 et TOLO3A sur la période de 1977 à 1980 - Bassin de la Tolomosa .....	201

## QUATRIEME PARTIE: ALLOCATION ET VALORISATION DES RESSOURCES HYDRIQUES DE SCENARIOS DE DEVELOPPEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE TOLOMOSA

TABLEAU IV-1: formes fonctionnelles de l'équation hédonique, paramètres de transformation Box-Cox et restrictions.....	208
TABLEAU IV-2: qualités retenues par utilisation agricole, pastorale et forestière de la terre considérée (Zonisig(b), 2001) .....	211
TABLEAU IV-3: surface exprimée en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude agricole - Bassin de la Tolomosa .....	211
TABLEAU IV-4: superficies exprimées en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude pour l'élevage extensif d'ovins - Bassin de la Tolomosa.....	211
TABLEAU IV-5: superficies exprimées en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude pour l'élevage extensif de bovins – Bassin de la Tolomosa.....	212
TABLEAU IV-6: superficies exprimées en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude forestière – Bassin de la Tolomosa .....	212
TABLEAU IV-7: classes de pente, paysages dominants et superficies correspondantes - Bassin de la Tolomosa .....	217
TABLEAU IV-8: description des variables indépendantes observées par propriété .....	221
TABLEAU IV-9: comparaison du volume et de la surface du réservoir avant et après l'installation des boudins gonflables (source: Caryglobal srl) – Bassin de la Tolomosa .....	223
TABLEAU IV-10: cote annuelle moyenne du niveau d'eau dans le réservoir et volume annuel d'eau turbiné de 2000 à 2004 (adapté de PMSJ) .....	225
TABLEAU IV-11: localités principales et population en 2001 (source: INE, 2001) – Bassin de la Tolomosa .....	225
TABLEAU IV-12: pourcentage de la population par secteur d'activités (adapté de INE, 2001; communications du Bureau de l'aménagement du territoire de la préfecture, 2007) – Bassin de la Tolomosa .....	226
TABLEAU IV-13: valeurs mensuelles moyennes de la production électrique (kWh) et du volume d'eau utile sur la période de 2000 à 2004 (source: PMSJ).....	227
TABLEAU IV-14: revenu brut total annuel de la vente d'énergie électrique par le PMSJ (source: PMSJ) .....	229
TABLEAU IV-15: surfaces agricoles cultivées par classe de terre (AGRC) et par sous-bassin – Bassin de la Tolomosa .....	231
TABLEAU IV-16: rendement et revenu moyen par hectare des principales cultures (mars 2006: 1 USD = 8 BOB) (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001; Faculté des Sciences économiques UAJMS, J. Orellano R., base de données non publiée) - Bassin de la Tolomosa .....	233
TABLEAU IV-17: revenu agricole familial moyen brut (mars 2006: 1 USD = 8 BOB) (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001; Faculté des Sciences économiques UAJMS, J. Orellano R., base de données non publiée) – Bassin de la Tolomosa ....	233
TABLEAU IV-18: valeur annuelle brute de la production de la pomme de terre commercialisée – Bassin de la Tolomosa.....	233
TABLEAU IV-19: superficie des pâturages et répartition du cheptel par localité et sous-bassin versant (sources: SENASAG, registre de vaccination contre la fièvre aphteuse, 2005; INE, 2002) – Bassin de la Tolomosa.....	234
TABLEAU IV-20: répartition du cheptel bovin par sous-bassin (source: SENASAG, 2005) – Bassin de la Tolomosa.....	235
TABLEAU IV-21: production annuelle brute de lait et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) – Bassin de la Tolomosa .....	236
TABLEAU IV-22: production annuelle brute de viande et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) - Bassin de la Tolomosa .....	236
TABLEAU IV-23: production annuelle brute de laine et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) - Bassin de la Tolomosa .....	236
TABLEAU IV-24: production annuelle brute de viande ovine et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) - Bassin de la Tolomosa.....	237
TABLEAU IV-25: variables explicatives de la fonction hédonique et comportement supposé ...	238
TABLEAU IV-26: signe et significativité statistique des coefficients des variables indépendantes des trois formes fonctionnelles de l'équation hédonique (seuil de 5%).....	240
TABLEAU IV-27: résumé des statistiques descriptives de la régression .....	241

TABLEAU IV-28:	signe des coefficients associés aux variables indépendantes significatives et interprétation de l'élasticité pour la forme fonctionnelle double log. de l'équation hédonique....	243
TABLEAU IV-29:	valeurs des coefficients de la fonction hédonique (forme fonctionnelle double log.) et du t-ratio (valeurs absolues) avec et sans la présence de la variable dichotomique ENEL (intervalle de confiance de 5%).....	244
TABLEAU IV-30:	analyse de sensibilité des coefficients des variables indépendantes .....	245
TABLEAU IV-31:	valeurs des coefficients de la régression type probit et valeurs absolues des t statistiques (intervalle de confiance de 5%).....	246
TABLEAU IV-32:	caractéristiques du foncier selon la technique des prix hédoniques avec une forme fonctionnelle double log. (restriction $\theta = \lambda = 0$ ) – Bassin versant de la Tolomosa .....	247
TABLEAU IV-33:	répartition des terres par scénario envisageable de développement économique du bassin – Bassin de la Tolomosa. ....	249
TABLEAU IV-34:	superficie des terres aptes au scénario sylvo-pastoral par étage écologique et en % du bassin - Bassin de la Tolomosa.....	250
TABLEAU IV-35:	essence forestière, altitude et surface du scénario sylvo-pastoral par étage écologique – Bassin de la Tolomosa .....	251
TABLEAU IV-36:	estimation du volume de la production de bois dans le cas du scénario à vocation sylvicole – Bassin de la Tolomosa.....	254
TABLEAU IV-37:	valeur brute de la production totale par essence du scénario sylvo-pastoral – Bassin de la Tolomosa.....	255
TABLEAU IV-38:	surfaces des HRU définies par les modélisations TOLOHRU et HRUFOR – Bassin de la Tolomosa.....	256
TABLEAU IV-39:	résultats des termes du bilan en eau annuels moyens de la modélisation HRUFOR sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa .....	260
TABLEAU IV-40:	résultats des termes du bilan en eau mensuels moyens de la modélisation HRUFOR sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa .....	260
TABLEAU IV-41:	comparaison de l'allocation de l'eau et de la valeur annuelle brute de la production du bassin entre la situation sans projet et le scénario sylvo-pastoral (valeurs actualisées) – Bassin de la Tolomosa.....	263
TABLEAU IV-42:	écoulement total annuel moyen à l'exutoire et valeur annuelle brute de la production – Bassin de la Tolomosa.....	263
TABLEAU IV-43:	comparaison des valeurs du paramètre CN entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU du sous-bassin TolomosaA – Bassin de la Tolomosa .....	264
TABLEAU IV-44:	comparaison des valeurs du paramètre CN entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU du sous-bassin Mena – Bassin de la Tolomosa.....	264
TABLEAU IV-45:	comparaison des valeurs du paramètre CN entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU des sous-bassins Sola et Pinos – Bassin de la Tolomosa.....	264
TABLEAU IV-46:	comparaison des valeurs annuelles moyennes des termes du bilan en eau entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa .....	265
TABLEAU IV-47:	comparaison entre les volumes des sédiments dans le réservoir calculés par les bathymétries et simulés par la modélisation HRUFOR – Bassin de la Tolomosa.....	267

## LISTE DES FIGURES

### PREMIERE PARTIE: CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

FIGURE 1:	carte de la Bolivie et de ses départements	3
FIGURE 2:	carte de la localisation du bassin versant étudié	4
FIGURE I-1:	zone d'étude et grille UTM régionale – Bassin de la Tolomosa.....	11
FIGURE I-2:	image satellitaire Landsat 5TM (21 juin 1997) de la zone d'étude avec résolution géométrique au sol de 30 m par 30 m; couleurs réelles; PSAD56 (Zonisig(b), 2001) – Bassin de la Tolomosa .....	12
FIGURE I-3:	carte du réseau hydrographique - Bassin de la Tolomosa .....	15
FIGURE I-4:	carte géologique (source: Suárez, 1996; GEOBOL, 1991 et 1982; Ahlfeld et al., 1960) - Bassin de la Tolomosa.....	17
FIGURE I-5:	carte des domaines géomorphologiques (source: PEA, 2005; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001) .....	19
FIGURE I-6:	carte des unités de paysage (source: PEA, 2005; Zonisig 2001 et Espinoza, 2001 et 1996) – Bassin de la Tolomosa.....	23
FIGURE I-7:	carte des unités géomorphologiques (sous-paysages) (source: adapté de PEA, 2005; Zonisig 2001; Espinoza, 2001 et 1996) – Bassin de la Tolomosa.....	24
FIGURE I-8:	carte des sols selon la classification taxonomique FAO (source: adapté de Zonisig(b), 2001; Espinoza, 1995) - Bassin de la Tolomosa .....	28
FIGURE I-9:	carte des étages écologiques (source: Zonisig(b), 2001; Agrosig, 2001) - Bassin de la Tolomosa .....	30
FIGURE I-10:	carte du degré d'érosion (source: adapté d'Espinoza, 2002; Zonisig(b), 2001) - Bassin de la Tolomosa.....	33
FIGURE I-11:	carte des classes d'occupation des terres - Bassin de la Tolomosa .....	36

## DEUXIEME PARTIE: MODELE HYDROLOGIQUE ET BASE DE DONNEES

FIGURE II-1: schéma du cycle hydrologique terrestre de l'eau (source: Neitsch et al., 2002) .....	40
FIGURE II-2: schéma du développement historique du modèle SWAT (source: Gassman, 2007) .	42
FIGURE II-3: schéma de conceptualisation et présentation des données via l'interface AvSWAT du modèle SWAT (source: Neitsch et al., 2002).....	43
FIGURE II-4: schématisation des flux verticaux pris en compte par le modèle hydrologique.....	44
FIGURE II-5: schématisation des flux latéraux pris en compte par le modèle hydrologique .....	48
FIGURE II-6: schématisation des principaux paramètres pris en compte par les fonctions de transfert et échelles spatiales considérées (source: adapté de Chaponnière, 2005) .....	53
FIGURE II-7: schématisation d'une section de cours d'eau avec la méthode Muskingum et la méthode de stockage variable (Chow et al., 1988) .....	55
FIGURE II-8: réseau de stations pluviométriques et météorologiques par sous-bassin et précipitations mensuelles moyennes sur la période de mesures disponibles (source: adapté de SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa .....	67
FIGURE II-9: altitude des stations pluviométriques et météorologiques et variation altimétrique de la précipitation annuelle moyenne sur la période de mesures disponibles – Bassin de la Tolomosa	69
FIGURE II-10: régression linéaire entre les précipitations journalières cumulées des stations météorologiques de San Andres et Aeropuerto aux dates correspondantes sur la période de 1976 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	74
FIGURE II-11: régression linéaire entre les précipitations journalières cumulées des stations de Pinos (pluviométrique) et Aeropuerto (météorologique) aux dates correspondantes sur la période de 1976 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	74
FIGURE II-12: régression linéaire entre les précipitations journalières cumulées des stations de Calderilla (pluviométrique) et Aeropuerto (météorologique) aux dates correspondantes sur la période de 1976 à 1984 – Bassin de la Tolomosa .....	74
FIGURE II-13: précipitation mensuelle moyenne des stations à l'intérieur du bassin et de la station de référence sur la période de 1976 à 1984 (source: adapté de SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa .....	75
FIGURE II-14: distribution mensuelle moyenne de la radiation solaire à la station météorologique El Tejar (1977–84) (source: SENAMHI, 2002).....	77
FIGURE II-15: vue en relief du MNT et du périmètre du bassin – Bassin de la Tolomosa .....	80
FIGURE II-16: vue en perspective tridimensionnelle en couleurs réelles de l'image satellitaire du bassin – Bassin de la Tolomosa .....	81
FIGURE II-17: carte des classes d'occupation des terres (terminologie SWAT) – Bassin de la Tolomosa .....	83
FIGURE II-18: schéma de la répartition des sols – Bassin de la Tolomosa.....	85
FIGURE II-19: carte des unités des sols (nomenclature USDA) et localisation des profils étudiés - Bassin de la Tolomosa.....	87
FIGURE II-20: vue en 3D des unités des sols et des groupes hydrologiques correspondants – Bassin de la Tolomosa.....	88
FIGURE II-21: courbe de sédimentation du réservoir de San Jacinto sur la période de 1989 à 2004 (source: Caryglobal srl).....	90

## TROISIEME PARTIE: MODELISATION DU BILAN EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

FIGURE III-1:	découpage du bassin de la Tolomosa en un sous-bassin .....	96
FIGURE III-2:	découpage du bassin de la Tolomosa en deux sous-bassins .....	96
FIGURE III-3:	découpage du bassin de la Tolomosa en trois sous-bassins .....	96
FIGURE III-4:	découpage du bassin de la Tolomosa en quatre sous-bassins .....	96
FIGURE III-5:	découpage du bassin de la Tolomosa en six sous-bassins .....	96
FIGURE III-6:	découpage du bassin de la Tolomosa en onze sous-bassins .....	96
FIGURE III-7:	carte des sous-bassins et réseau hydrographique - Bassin de la Tolomosa.....	98
FIGURE III-8:	schéma des modélisations du bilan en eau de la situation actuelle et du scénario de développement – Bassin de la Tolomosa .....	99
FIGURE III-9:	paramètres sensibles de contrôle du ruissellement et des écoulements .....	101
FIGURE III-10:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation du paramètre ESCO .....	102
FIGURE III-11:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation du paramètre EPCO .....	102
FIGURE III-12:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation du paramètre GW_REVAP .....	103
FIGURE III-13:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en mm du paramètre REVAPMN .....	104
FIGURE III-14:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en jours du paramètre GW_DELAY .....	104
FIGURE III-15:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en jours du paramètre ALPHA_BF .....	105
FIGURE III-16:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en mm du paramètre GWQMN .....	106
FIGURE III-17:	écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en jours du paramètre LAT_TTIME .....	106
FIGURE III-18:	régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolofi}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 (run 6KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	110
FIGURE III-19:	résidus en $m^3/s$ pour la phase et période de calibrage de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa .....	111
FIGURE III-20:	comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa .....	113
FIGURE III-21:	comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa .....	114
FIGURE III-22:	évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1981. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	115
FIGURE III-23:	évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	116
FIGURE III-24:	hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1978 .....	117
FIGURE III-25:	hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1978 à 1979 .....	118
FIGURE III-26:	hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1979 à 1980 .....	119
FIGURE III-27:	hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des	

précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1980 à 1981 .....	120
FIGURE III-28: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) et observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation sur la période d'août 81 à juillet 84 (run 6KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	121
FIGURE III-29: résidus en $\text{m}^3/\text{s}$ pour la phase et période de validation de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa .....	122
FIGURE III-30: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa .....	124
FIGURE III-31: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation (1981-84) - Bassin de la Tolomosa .....	125
FIGURE III-32: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1984. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	126
FIGURE III-33: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) correspondants en mm pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1982. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	127
FIGURE III-34: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et des débits simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1982 .....	128
FIGURE III-35: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et des débits simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1982 à 1983 .....	129
FIGURE III-36: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et des débits simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1983 à 1984 .....	130
FIGURE III-37: variation mensuelle moyenne des valeurs de précipitations et des termes du bilan en eau – Bassin de la Tolomosa .....	132
FIGURE III-38: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa .....	133
FIGURE III-39: évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes (TOLOFI, run 6KUL2) - Bassin de la Tolomosa .....	134
FIGURE III-40: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1977-78 – Bassin de la Tolomosa .....	135
FIGURE III-41: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1978-79 – Bassin de la Tolomosa .....	136
FIGURE III-42: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1979-80 – Bassin de la Tolomosa .....	137
FIGURE III-43: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1980-81 – Bassin de la Tolomosa .....	138
FIGURE III-44: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1981-82 – Bassin de la Tolomosa .....	139
FIGURE III-45: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1982-83 – Bassin de la Tolomosa .....	140
FIGURE III-46: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ ) sur l'année hydrologique 1983-84 – Bassin de la Tolomosa .....	141
FIGURE III-47: comparaison entre les modélisations TOLOFI et TOLOMAT des variations mensuelles moyennes des valeurs des termes du bilan en eau sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa .....	148
FIGURE III-48: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolofi}}$ et $Q_{\text{tolomat}}$ ) par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa .....	149

FIGURE III-49: évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ et $Q_{tolomat}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa .....	151
FIGURE III-50: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ et $Q_{tolomat}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1981. Station de San Jacinto – Bassin de la Tolomosa.....	152
FIGURE III-51: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ et $Q_{tolomat}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1984. Station de San Jacinto – Bassin de la Tolomosa.....	153
FIGURE III-52: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78 (run 98 avec CN <sub>2</sub> matrice) - Bassin de la Tolomosa .....	156
FIGURE III-53: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78 (run 103 avec CN <sub>2S</sub> SWAT) - Bassin de la Tolomosa .....	156
FIGURE III-54: résidus en m <sup>3</sup> /s pour la phase et période de calibrage de la modélisation TOLO3A (run 103 avec CN SWAT) – Bassin de la Tolomosa.....	157
FIGURE III-55: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage (run 103) - Bassin de la Tolomosa .....	159
FIGURE III-56: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ et $Q_{tolofi}$ ) en m <sup>3</sup> /s sur la période d'août 77 à juillet 78. Station de San Jacinto - Bassin de la Tolomosa .....	160
FIGURE III-57: hydrogrammes des débits journaliers disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ , $Q_{tolo3A}$ ) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1978 – Bassin de la Tolomosa .....	161
FIGURE III-58: régression linéaire entre les débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ avec CN <sub>2S</sub> SWAT) pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa.....	162
FIGURE III-59: résidus en m <sup>3</sup> /s pour la phase de validation de la modélisation TOLO3A (CN <sub>2S</sub> SWAT) – Bassin de la Tolomosa .....	163
FIGURE III-60: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa.....	165
FIGURE III-61: évolution temporelle des hydrogrammes des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ et $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1978 à 1980. Station de San Jacinto (run 103) - Bassin de la Tolomosa .....	166
FIGURE III-62: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolofi}$ , $Q_{tolo3A}$ ) via les modélisations TOLOFI (run 6KUL2) et TOLO3A (run 103) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1978 à 1979 – Bassin de la Tolomosa .....	167
FIGURE III-63: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolofi}$ , $Q_{tolo3A}$ ) via les modélisations TOLOFI (run 6KUL2) et TOLO3A (run 103) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1979 à 1980 – Bassin de la Tolomosa .....	168
FIGURE III-64: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ et $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1980 – Bassin de la Tolomosa.....	170
FIGURE III-65: évolution temporelle du total mensuel moyen des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ et $Q_{tolofi}$ ) à l'exutoire et des précipitations mensuelles correspondantes aux mêmes dates sur la période de 1977 à 1980- Bassin de la Tolomosa.....	171
FIGURE III-66: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ et $Q_{tolofi}$ ) sur la période de l'année hydrologique 1977-78 – Bassin de la Tolomosa.....	172
FIGURE III-67: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ et $Q_{tolofi}$ ) sur la période de l'année hydrologique 1978-79 – Bassin de la Tolomosa.....	173
FIGURE III-68: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ et $Q_{tolofi}$ ) sur la période de l'année hydrologique 1979-80 – Bassin de la Tolomosa.....	174
FIGURE III-69: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolohru}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 (run 135) - Bassin de la Tolomosa .....	178

FIGURE III-70: résidus en m <sup>3</sup> /s estimés pour la phase et période de calibrage (1977-81) de la modélisation TOLOHRU (run 135) – Bassin de la Tolomosa.....	180
FIGURE III-71: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa.....	182
FIGURE III-72: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa.....	183
FIGURE III-73: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1981. Station de San Jacinto - Bassin de la Tolomosa.....	184
FIGURE III-74: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolohru}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation sur la période d'août 81 à juillet 84 (run 135) - Bassin de la Tolomosa.....	185
FIGURE III-75: résidus en m <sup>3</sup> /s pour la phase et période de validation de la modélisation TOLOHRU – Bassin de la Tolomosa.....	186
FIGURE III-76: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa.....	188
FIGURE III-77: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa.....	189
FIGURE III-78: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1984. Station de San Jacinto - Bassin de la Tolomosa.....	190
FIGURE III-79: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	192
FIGURE III-80: évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa.....	193
FIGURE III-81: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ , $Q_{tolomat}$ , $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	198
FIGURE III-82: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ , $Q_{tolomat}$ , $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	198
FIGURE III-83: évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ , $Q_{tolomat}$ et $Q_{tolohru}$ ) pour les mêmes dates à l'exutoire et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa.....	200

## QUATRIEME PARTIE: ALLOCATION ET VALORISATION DES RESSOURCES HYDRIQUES DE SCENARIOS DE DEVELOPPEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE TOLOMOSA

FIGURE IV-1:	carte des classes d'aptitude agricole - Bassin de la Tolomosa .....	213
FIGURE IV-2:	carte des classes d'aptitude pastorale (élevage extensif d'ovins) - Bassin de la Tolomosa .....	214
FIGURE IV-3:	carte des classes d'aptitude pastorale (élevage extensif de bovins) - Bassin de la Tolomosa .....	215
FIGURE IV-4:	carte des classes d'aptitude forestière - Bassin de la Tolomosa.....	216
FIGURE IV-5:	carte des classes de pente – Bassin de la Tolomosa.....	218
FIGURE IV-6:	histogramme des classes de pente – Bassin de la Tolomosa.....	219
FIGURE IV-7:	courbe hypsométrique – Bassin de la Tolomosa.....	219
FIGURE IV-8:	localisation des propriétés agricoles étudiées dans les trois sous-bassins – Bassin de la Tolomosa.....	222
FIGURE IV-9:	fluctuation journalière du niveau d'eau dans le réservoir de San Jacinto sur la période de 1989 à 2003 (source: PMSJ; communication de mars 2006) – Bassin de la Tolomosa .....	224
FIGURE IV-10:	comparaison entre la cote mensuelle moyenne (mètre) du niveau d'eau dans le réservoir de San Jacinto et la quantité d'énergie produite (kWh) sur la période de 2000 à 2004 (source: PMSJ) – Bassin de la Tolomosa .....	228
FIGURE IV-11:	calendrier cultural et rotation annuelle des cultures – Bassin de la Tolomosa....	232
FIGURE IV-12:	coupe transversale du bassin et essences forestières recommandées (scénario sylvo-pastoral) – Bassin de la Tolomosa .....	251
FIGURE IV-13:	carte des unités d'occupation des terres du scénario de développement sylvo-pastoral – Bassin de la Tolomosa .....	253
FIGURE IV-14:	comparaison entre les hydrogrammes des débits journaliers simulés de la situation actuelle ( $Q_{tolohru}$ ) et de la situation avec scénario ( $Q_{hrufor}$ ) sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	257
FIGURE IV-15:	comparaison sous forme logarithmique entre les hydrogrammes des débits journaliers simulés de la situation actuelle ( $Q_{tolohru}$ ) et de la situation avec scénario ( $Q_{hrufor}$ ) sur la période de 1977 à 1984 (première partie) – Bassin de la Tolomosa.....	258
FIGURE IV-16:	comparaison sous forme logarithmique entre les hydrogrammes des débits journaliers simulés de la situation actuelle ( $Q_{tolohru}$ ) et de la situation avec scénario ( $Q_{hrufor}$ ) sur la période de 1977 à 1984 (deuxième partie) – Bassin de la Tolomosa .....	259
FIGURE IV-17:	comparaison des sommes annuelles des écoulements totaux simulés aux dates correspondantes par année hydrologique des modélisations TOLOHRU et HRUFOR sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa.....	261
FIGURE IV-18:	évolution temporelle du total mensuel des débits simulés ( $Q_{hrufor}$ et $Q_{tolohru}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984- Bassin de la Tolomosa.....	262
FIGURE IV-19:	comparaison d'ETR mensuelle moyenne simulée entre les modélisations TOLOHRU et HRUFOR .....	265

## LISTE DES ANNEXES

Annexe I-1: reportage photographique sur le bassin versant de la Tolomosa

Annexe I-2: zone UTM de la Bolivie et du bassin versant de la Tolomosa

Annexe I-3: fiche de terrain utilisée pour les levés pédologiques

Annexe II-1: tableaux des débits journaliers observés à l'exutoire du bassin versant de la Tolomosa de 1978 à 1984

Annexe II-2: couverture végétale et occupation des terres dans le bassin versant de la Tolomosa selon la nomenclature FAO/UNESCO et SWAT

Annexe II-3: classification FAO et USDA des sols du bassin versant de la Tolomosa

Annexe II-4: comparaison par année hydrologique entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1976 à juillet 1984

Annexe III-1: valeurs du CN par modélisation et sous-bassin versant

Annexe III-2: matrice des valeurs du CN en fonction des groupes hydrologiques, des unités géomorphologiques et des unités d'occupation des terres

Annexe IV-1: aptitudes des terres du bassin versant de la Tolomosa

Annexe IV-2: base de données par propriété agricole

Annexe IV-3: output du logiciel LIMDEP7 de l'équation des prix hédoniques

Annexe IV-4: essences choisies pour le scénario de développement sylvo-pastoral



# **INTRODUCTION GENERALE**



## 1. CADRE DE L'ETUDE

La conscience de la population bolivienne, en particulier celle du département de Tarija, s'est approfondie durant cette décennie quant à la détérioration des ressources naturelles, principalement hydriques. L'environnement fournit des services qui contribuent à l'amélioration du bien-être. En même temps, la croissance économique est accompagnée d'effets nuisibles significatifs sur la qualité d'environnement. Cette dichotomie est due en partie à l'idée très répandue que la croissance économique et la qualité environnementale sont des alternatives; la détérioration de cette qualité environnementale est regardée comme un coût nécessaire pour une croissance économique rapide.

Le manque de données physiques et hydrologiques fiables et de suivi technique sur l'état actuel du bassin versant de la Tolomosa ont permis un déséquilibre naturel et une dégradation importante de l'écosystème. Cette situation affecte sérieusement les investissements productifs réalisés ces vingt dernières années (capacité du barrage du Projet Multiple de San Jacinto conclu en 1989).

## 2. LE BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA

La Bolivie possède une superficie de 1.098.581 km<sup>2</sup> pour une population approximative de neuf millions d'habitants. Limitée par la cordillère des Andes à l'Ouest, elle n'a pas d'accès direct à la mer. Durant son histoire, le pays a perdu la moitié de son territoire au cours de nombreuses guerres contre ses voisins. La dernière en date, celle du Chaco (1932-35), a inspiré les aventures de Tintin écrites par Hergé dans l'*Oreille Cassée*.

La Bolivie, découpée en neuf départements, est présentée sur la carte de la figure 1. Le département de Tarija, où se trouve le bassin versant de la Tolomosa, se situe au sud du pays, avec une superficie de 37.623 km<sup>2</sup>. La division administrative du département comprend la province, la commune, la section, le district, le canton et, enfin, la communauté.

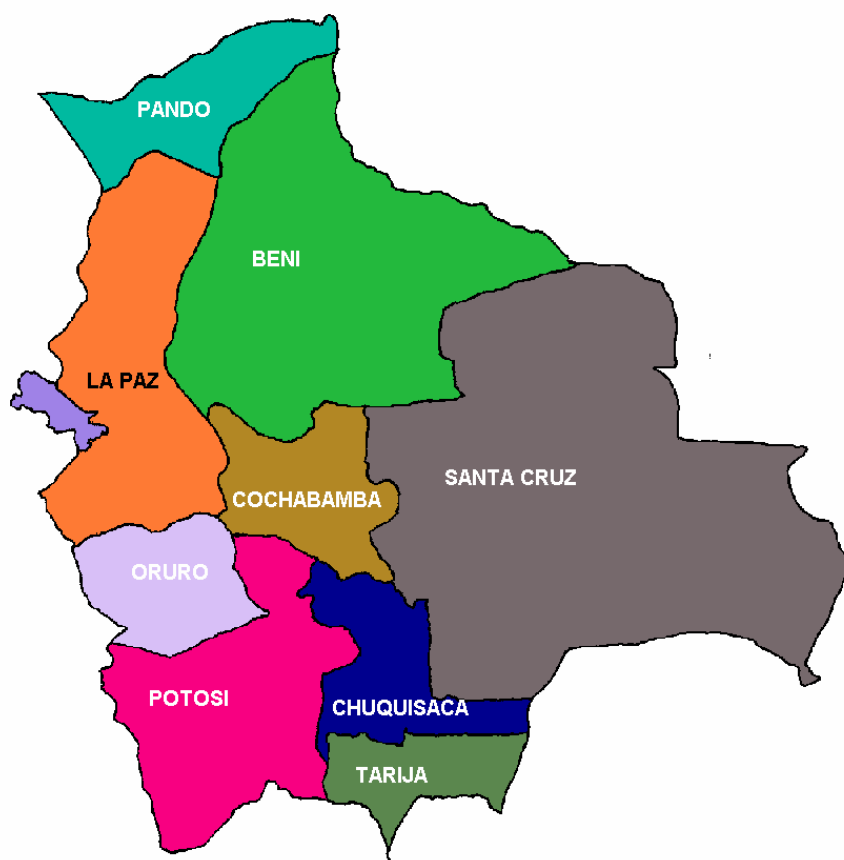


FIGURE 1: carte de la Bolivie et de ses départements

Le bassin versant jauge de la rivière Tolomosa se situe dans la province de Cercado (2.075 km<sup>2</sup>) près de la ville de Tarija, capitale du département du même nom. Le bassin couvre une superficie de 436,72 km<sup>2</sup> (43.672 ha) jusqu'à la gorge de San Jacinto. Il est entouré de hautes montagnes, dont l'altitude varie entre 4.600 m et 3.800 m au sud-ouest et 1.880 m au nord-est avec un dénivelé d'environ 2.000 m sur une distance assez courte de 35 km; la largeur varie de 18 km à 7 km suivant l'endroit. Le bassin doit son importance au potentiel hydrique superficiel dont il dispose. Malgré sa petite étendue, il est très variable en termes de climats et microclimats, de géomorphologie, de géologie, des sols et de végétation. La situation du bassin versant est présentée sur la carte de la figure 2.

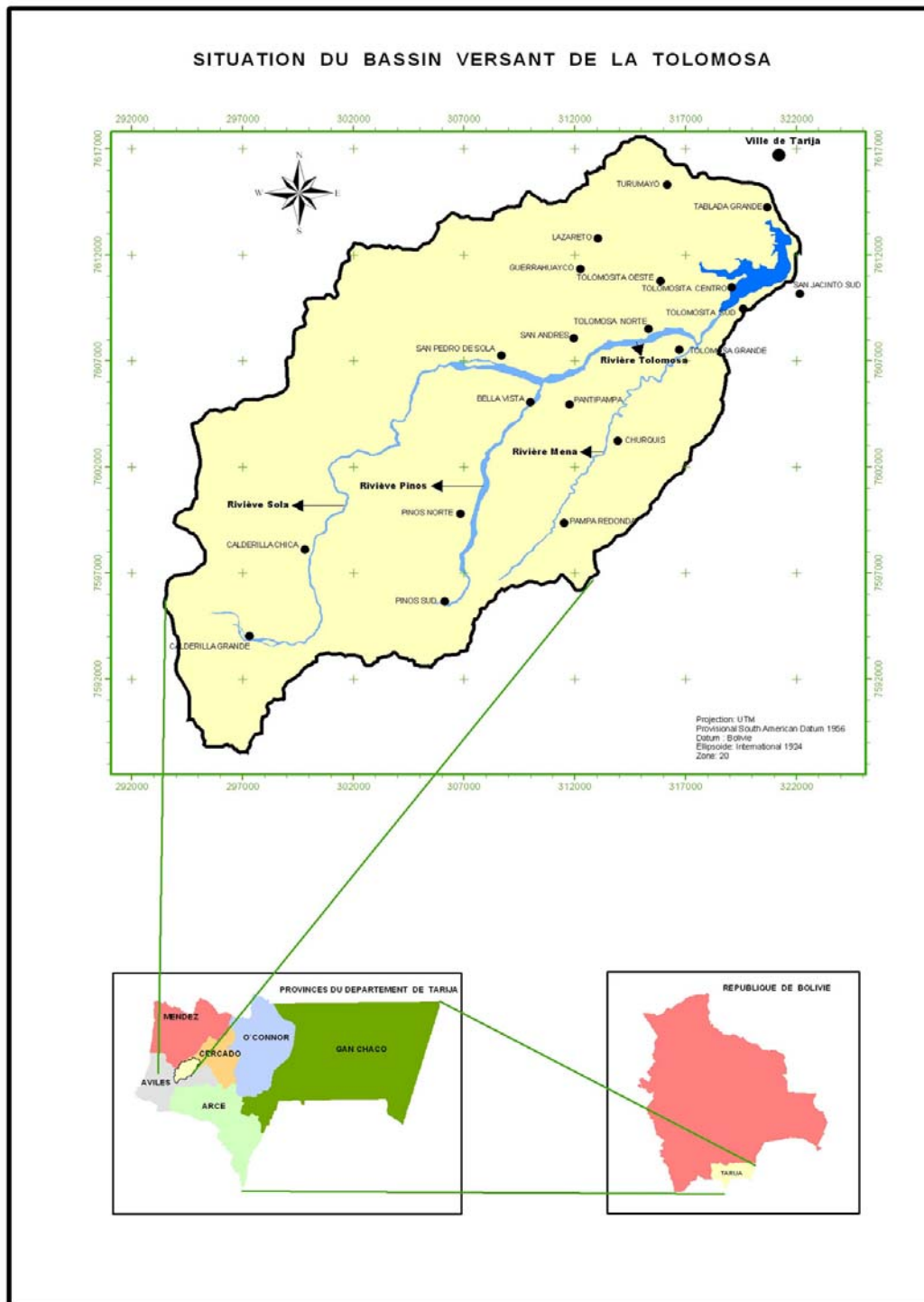


FIGURE 2: carte de la localisation du bassin versant de la rivière Tolomosa

### **3. OBJECTIF**

L'objectif poursuivi dans cette thèse vise à estimer les termes du bilan en eau du bassin versant de la Tolomosa en vue de permettre l'analyse et la comparaison de sa réponse hydrologique face aux changements de paramètres biophysiques dus à l'application d'un scénario théorique de développement pour, enfin, proposer une méthodologie mixte de modélisation hydrologique et de valorisation en termes relatifs de la ressource « eau » produite par le bassin considéré comme une fabrique d'eau, et cela grâce à l'information fournie par le croisement entre les résultats de la modélisation du bilan en eau issus de l'application du scénario choisi et du calcul de la valeur monétaire correspondante de la production générée dans le bassin versant.

### **4. DEMARCHE**

Cette thèse s'articule autour de quatre grandes parties lesquelles sont divisées en chapitres et décrites dans les paragraphes qui suivent. La démarche reflète la dimension multidisciplinaire de l'analyse qui comprend les caractéristiques biophysiques du bassin versant, l'hydrologie avec la modélisation du bilan hydrique du bassin et, enfin, l'économie pour arriver à valoriser l'importance du facteur productif eau.

La première partie de la thèse s'attache à construire la base générale des données physiques nécessaires à l'étude hydrologique du bassin versant de la Tolomosa en s'appuyant sur les données existantes y compris l'image satellitaire Landsat 5TM (21 juin 1997) et celles obtenues des observations de terrain.

La seconde partie du travail décrit le modèle hydrologique SWAT utilisé pour l'estimation des termes du bilan en eau du bassin versant de la Tolomosa ainsi que les différents paramètres et flux régissant la modélisation du bilan en eau du bassin. Les données et l'exploitation des résultats sont gérées grâce au système d'information géographique (SIG) ArcView 3.2.

Dans la troisième partie, le modèle semi-distribué SWAT couplé au SIG ArcView 3.2 (AvSWAT) estime les termes du bilan en eau du bassin versant via sept modélisations différentes. Cette partie démarre avec la collecte et l'analyse des données débimétriques et météorologiques et des données spécifiques requises pour l'estimation du bilan par le modèle hydrologique, y compris l'établissement du modèle numérique de terrain. Toutes les données sont digitalisées et géoréférencées.

Enfin, dans la quatrième partie, une allocation des ressources hydriques produites par le bassin versant est proposée en fonction d'un scénario théorique de développement. Le croisement des résultats de la modélisation du bilan en eau sur base de l'application du scénario choisi et de la valeur correspondante de la production générée par le bassin permet de valoriser en termes relatifs la ressource « eau » produite par le bassin versant considéré comme une fabrique d'eau.

Ce travail s'achève par la formulation de conclusions et de recommandations suggérées par les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche.

La méthodologie propre à chaque partie de la thèse est détaillée dans chacune des quatre parties de la thèse.



## **PREMIERE PARTIE**

### **CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA**



## I-1 BASE DE DONNEES

L'étude physique du bassin versant se base sur l'analyse de l'information secondaire disponible et utilisable et la génération de l'information originale (information primaire). L'information primaire a été obtenue principalement à partir des sorties de terrain et de l'analyse complémentaire de l'image satellitaire Landsat 5TM qui ont permis surtout d'améliorer les connaissances pédologiques, de l'érosion et géomorphologiques du bassin.

L'ensemble de l'information a été mis sous la forme d'une base dynamique de données administrée par le système d'information géographique SIG ArcView 3.2a et traduite en différents tableaux et cartes thématiques.

### I-1.1 SOURCES PRINCIPALES

Les sources principales des informations secondaires disponibles et utilisables sont les suivantes:

**Projet ERTS-GEOBOL (1982):** les premières études sur les ressources naturelles en Bolivie remontent aux années septante, avec le démarrage en 1972 du Programme ERTS-GEOBOL entre la Bolivie et les Etats-Unis. Le but était d'étudier les ressources naturelles du pays à l'échelle 1/1.000.000 et 1/250.000 sur base des images générées par le satellite ERTS. Cette étude contient principalement des informations sur les aspects géologiques, géomorphologiques, végétatifs, hydrologiques, climatiques et d'occupation des terres.

**Service National de Météorologie et Hydrologie (SENAMHI):** la section départementale du Service National de Météorologie et Hydrologie (SENAMHI) possède de nombreux relevés climatiques et quelques observations débitométriques des rivières principales du département.

**Projet ZONISIG (1993–2001):** les gouvernements de Bolivie et des Pays-Bas financèrent de 1993 à 2001 le projet de Zonage Agro-écologique et Constitution d'une Base de Données et d'un Réseau d'Information Géographique en Bolivie (ZONISIG), dont le but était d'élaborer le zonage agro-écologique et socio-économique des départements du pays comme instrument pour la planification des ressources naturelles renouvelables. Ce projet offre une grande quantité d'informations secondaires telles que l'information thématique issue de la télédétection.

**Institut Géographique Militaire (IGM):** en plus des cartes topographiques disponibles (1/250.000 et 1/50.000), l'institut possède un certain nombre de cartes thématiques pour le bassin versant de la rivière Bermejo (1/250.000).

**Programme Stratégique d'Actions (PEA):** ce programme a démarré en 1997 et couvre le bassin versant de la rivière Bermejo à cheval sur la Bolivie et l'Argentine. Son objectif est de promouvoir le développement du bassin versant à travers la mise en œuvre d'activités telles que le contrôle de la dégradation des sols, la prévention de l'érosion et la conservation de l'habitat aquatique et terrestre. Bien que la zone d'action soit hors de notre bassin, ce programme peut être considéré comme une bonne source d'informations secondaires.

**Protection du Milieu Tarija (PROMETA):** cette ONG a effectué un certain nombre d'études sur la Réserve de Sama au sud-ouest du bassin de la Tolomosa qui sont considérées comme une bonne source d'informations secondaires.

**Institut Interuniversitaire Bolivien des Ressources Hydriques (INIBREH):** l'Institut interuniversitaire, à travers les universités membres, a accès à de l'information secondaire ponctuelle telle que par exemple des travaux de fin d'études.

**Service National des Aires Protégées (SERNAP):** ce service a un bureau départemental chargé de la gestion des réserves naturelles de Sama et Tariquia. Des études y ont été menées principalement sur les aspects biotiques.

**Entreprise Nationale d'Electricité (ENDE):** possède des registres de mesures débitométriques à l'exutoire du bassin versant de la Tolomosa.

## I-1.2 SYSTEME DE REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE

La plupart des cartes en Bolivie utilisent le datum géodésique Provisional South America Datum de 1956 (PSAD56) situé à La Canoa (Venezuela), avec la projection Universal Transverse Mercator (UTM) et l'ellipsoïde<sup>1</sup> Hayford 1909 ou l'International 1924. Plus récemment s'est introduit le World Geodesic System de 1984 (WGS84) qui utilise le système de projection UTM et, comme ellipsoïde de référence, l'ellipsoïde WGS84.

Le bassin versant étudié se situe dans la zone UTM 20S avec les coordonnées suivantes: 21° 32' de latitude sud; 64° 43' de longitude ouest (confer annexe I-2). Le système de projection et les données géographiques utilisés dans cette thèse sont repris dans le tableau I-1.

**TABLEAU I-1: paramètres de la projection locale – Bassin versant de la Tolomosa**

Paramètres	Valeurs
Datum	PSAD56
Ellipsoïde	Internationale 1924
Grid	Universal Transverse Mercator (UTM)
Zone	21 (Sud)
Méridien central	- 65°
Latitude de référence	- 17
Coordonnée Est de l'origine	500.000
Coordonnée Nord de l'origine	10.000.000
Unité du système	Mètre

Les coordonnées UTM des quatre points extrêmes du bassin versant de la Tolomosa sont données dans le tableau I-2.

**TABLEAU I-2: coordonnées UTM des quatre points extrêmes du bassin – Bassin de la Tolomosa**

	Projection UTM (m)	
	X	Y
E	322.220	7.612.407
O	293.364	7.595.507
N	314.806	7.617.617
S	296.971	7.588.494

La figure I-1 situe le bassin versant étudié dans la grille UTM régionale.

<sup>1</sup> L'ellipsoïde est une surface de référence non influencée par la gravité comme le géoïde



**FIGURE I-1: zone d'étude et grille UTM régionale – Bassin de la Tolomosa**

### I-1.3 IMAGE SATELLITAIRE

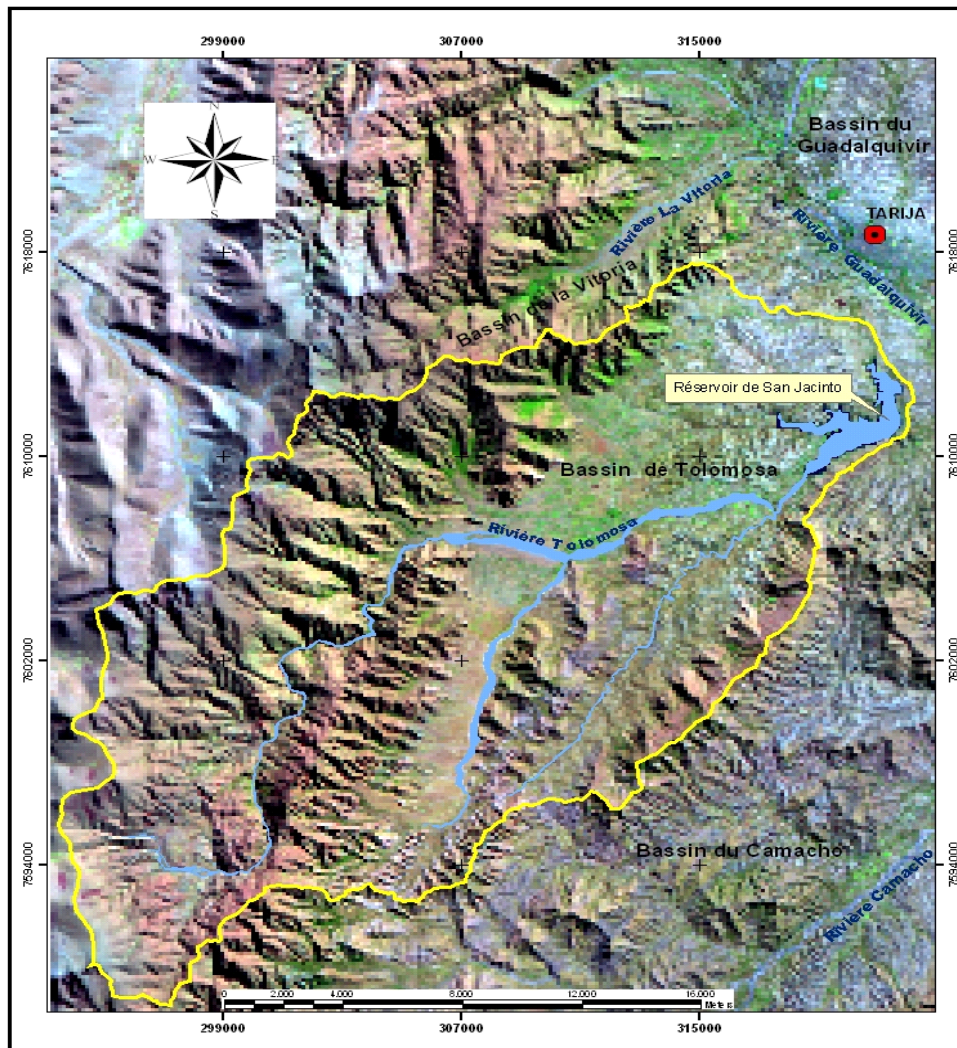
L'image satellitaire source utilisée couvre une superficie de 185 km par 185 km comprenant tout le bassin versant de la Tolomosa et obtenue par Zonisig (2001) du Centre d'Etude des Ressources naturelles par la Télédétection, Equateur (CLIRSEN). Elle provient du satellite Landsat 5TM<sup>1</sup> à la date du 21 juin 1997. Elle possède trois bandes qui correspondent à une plage spécifique du spectre électromagnétique: TM3 (R ou rouge), TM4 (G ou vert) et TM5 (B ou bleu) des 7 bandes possibles. Ces bandes sont bien adaptées pour cette étude, car elles réfléchissent mieux l'eau, la végétation et les sols. Sa résolution géométrique au sol est de 30 m x 30 m pour les canaux multispectraux (sauf pour le canal infrarouge thermique non utilisé dans cette étude).

Cette image, géoréférencée en UTM (datum PSAD56) par le programme ERDAS, a subi un certain nombre de traitements numériques sous forme de polygones homogènes avec un nombre variable de pixels, dont les résultats ont permis de passer directement à la classification personnalisée ou supervisée<sup>2</sup>. Ce traitement numérique de l'image a été effectué par le projet Zonisig (2001).

La figure I-2 représente la partie de l'image satellitaire utilisée pour l'étude (mode *grid* et ramenée à l'échelle 1/50.000).

<sup>1</sup> Equipé de deux capteurs multispectraux (Multi Spectral Scanner - MSS et Thematic Mapper - TM). La durée d'un cycle: 16 jours

<sup>2</sup> Permet de retrouver tous les pixels de l'image avec les mêmes caractéristiques



**FIGURE I-2: image satellitaire Landsat 5TM (21 juin 1997) de la zone d'étude avec résolution géométrique au sol de 30 m par 30 m; couleurs réelles; PSAD56 (Zonisig(b), 2001) – Bassin de la Tolomosa**

On remarque sur l'image le réservoir de San Jacinto situé au nord-est du bassin versant délimité par la ligne jaune et la rivière Tolomosa qui coule du sud-ouest vers le nord-est pour se jeter dans le réservoir.

### I-1.4 TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement de l'information a suivi la démarche générale suivante:

1. Compilation et systématisation des données biotiques et non biotiques secondaires existantes suivies de leur évaluation, sélection, homogénéisation et systématisation afin de les rentrer dans la base de données SIG de l'étude.
2. Interprétation visuelle<sup>1</sup> de l'image (ton, etc.) et (ré)délimitation provisoire en polygones (mode vectoriel) d'unités de surface (appelées aussi de terrain) homogènes et spatialement géoréférencées du milieu non biotique et biotique du bassin versant. Ces unités sont définies en fonction d'un facteur thématique précis et représentent des unités cartographiques ayant des propriétés communes (groupes homogènes de pixels). Cette homogénéité peut être du point de vue géologique en termes de lithologie; géomorphologique en termes de paysages; de la formation végétale en termes de formes de vie telles qu'arbres, arbustes et herbacées; du point de vue des sols en termes d'associations des sols; enfin, du point de vue du climat en termes de types climatiques ou d'étages écologiques. Cependant, comme le paysage est formé d'entités

<sup>1</sup> La méthode utilise la composition colorée RGB (rouge, vert, bleu) de l'image pour faire ressortir les éléments biotiques et non biotiques qui nous intéressent tels que l'eau (bande 3), la végétation (bande 4) et les sols (bande 5)

complexes qui peuvent varier de façon continue ou discontinue sur de faibles distances, rares sont les endroits où des limites précises d'ensembles homogènes sont observées. Des zones vraiment homogènes rencontrées sur l'image satellitaire sont le plan d'eau de San Jacinto ou les affleurements rocheux.

3. Digitalisation sous forme vectorielle<sup>1</sup> des limites des nouveaux polygones homogènes<sup>2</sup> (re)définis préalablement à partir des résultats des sorties de terrain suivant les catégories d'intérêt (formations nouvelles ou ajustement spatial) sur l'image satellitaire. Ces nouvelles observations primaires sont géoréférencées par l'emploi d'un GPS<sup>3</sup> (coordonnées UTM) et concernent surtout la nature et la densité du couvert végétal, le type de sol et certains aspects anthropiques tels que les cultures. Une fiche technique de terrain est remplie avec les données pertinentes. Cette activité correspond à l'élaboration préliminaire de cartes thématiques. Un lien est créé entre la base numérique et géographique de données.
4. Interprétation définitive et production des cartes thématiques. Les unités de terrain sont affinées, (re)délimitées ainsi que les superficies calculées en hectare en fonction du nombre de pixels. Chaque unité est supportée par une base de données spécifique liée au SIG qui possède trois composantes principales: code, position spatiale et la propriété.

## I-2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT

Rappelons que le milieu physique du bassin est le milieu non biotique qui désigne tous les agents physiques et chimiques qui ont un effet sur la matière vivante sans être eux-mêmes vivants.

### I-2.1 CARTES THEMATIQUES

Le bassin versant est caractérisé par quatre grands facteurs physiques<sup>4</sup> principaux qui ont une influence sur les processus hydrologiques du bassin, à savoir la pente, les roches ou matériaux géologiques, la géomorphologie et les sols. Cette caractérisation est présentée sous forme de cartes thématiques géoréférencées.

Les données sont administrées par le système d'information géographique SIG ArcView 3.2a qui propose un ensemble complet de fonctionnalités pour la saisie, le stockage, la mise à jour, la représentation, l'interrogation, l'analyse, l'affichage<sup>5</sup> et l'impression de données géographiques géoréférencées. L'utilisation de ce SIG est dictée par le fait qu'il existe une interface avec le modèle hydrologique SWAT qui sera utilisée ultérieurement dans cette étude. ArcView 3.2a répond bien aux besoins de cette étude comme outil de cartographie thématique et logiciel intelligent pour la création et la mise à jour des bases de données.

Chaque carte est considérée comme une couche d'information (mode vectoriel ou *grid* suivant la nécessité<sup>6</sup>) géoréférencée dans le système UTM<sup>7</sup>. La représentation vectorielle est plus précise (localisation, distance) et utilise peu de mémoire. Par contre, le mode *grid* exige beaucoup de mémoire, est moins précis (distance, localisation) et n'a pas de topologie (polygones, nœuds, vecteurs, etc.). C'est pourquoi les cartes finales utilisent le mode vectoriel.

L'échelle de travail et la présentation des résultats sont définies essentiellement en fonction des objectifs poursuivis pour chaque carte et le niveau de détail de l'information disponible ou à rechercher. Cela nous oblige à tenir une certaine hiérarchie des unités utilisées (terrain, paysage, etc.). L'expérience locale (PEA, 1998; Zonisig(b), 2001) montre que l'agrandissement digital de l'image satellitaire Landsat à une échelle de 1/50.000 offre des résultats tout à fait acceptables sans perdre trop de la résolution. Nous adopterons donc l'échelle 1/50.000 pour les cartes thématiques.

Suivant le tableau 1-3, notre étude se situe au niveau des sous-paysages ou paysages, en fonction de la densité de l'information.

---

<sup>1</sup> Extension *draw line* de ArcView

<sup>2</sup> L'extension *geoprocessing* d'ArcView permet les ajustements aux polygones de l'image satellitaire

<sup>3</sup> GPS eTREX Vista Personal Navigator ® (GARMIN) avec 12 canaux parallèles permettant un repérage au sol avec une précision inférieure à 15 m. Ce point correspond alors à un cercle de 10 à 20 mètres de rayon qui est inférieur à un seul pixel de l'image

<sup>4</sup> Le milieu physique du bassin est le milieu non biotique (on préfère l'expression "non biotique" à son synonyme "abiotique", car ce dernier a aussi un autre sens qui peut porter à confusion, celui d'impropre à la vie) qui désigne tous les agents physiques et chimiques qui ont un effet sur la matière vivante sans être eux-mêmes vivants

<sup>5</sup> Sous forme de tableaux ou de cartes thématiques par exemple

<sup>6</sup> Croisement de l'information de cartes sous forme raster; digitalisation sous forme vectorielle

<sup>7</sup> Les coordonnées correspondent au coin du pixel (en mode *grid*) ou au centre du pixel (en mode image)

**TABLEAU I-3: densité des observations de terrain**

Niveau de l'étude	Domaine géomorphologique (1)	Paysage		Sous-paysage		Élément de paysage
		Reconnaissance	Observation/km <sup>2</sup>	Semi-détaillée	Observation/km <sup>2</sup>	
Echelle	< 1/500.000	1/250.000 1/100.000	0,01-0,02 0,3-0,6	1/100.000 1/50.000	0,3-0,6 1 – 2	1/25.000 1/10.000
Type de télédétection	Image satellitaire	Image satellitaire Photo aérienne de grande altitude		Image satellitaire Photo aérienne		Photo aérienne

(1) Association de paysages ayant une même relation spatiale (élévation, etc.) et génétique (sédimentation, etc.)

## I-2.2 CARTE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

On considère qu'un sous-bassin doit avoir un talweg géographiquement bien tracé d'écoulement direct vers l'exutoire. Les aires des différents sous-bassins qui drainent directement dans le réservoir de San Jacinto sans présenter un talweg bien défini ne sont pas identifiées séparément.

Sur base des modalités précitées, le bassin versant de la rivière Tolomosa a été divisé en huit sous-bassins, comme indiqué dans le tableau I-4 et sur la carte de la figure I-3. La superficie du niveau de l'eau du réservoir est prise à l'altitude 1.884 m et représente la superficie moyenne.

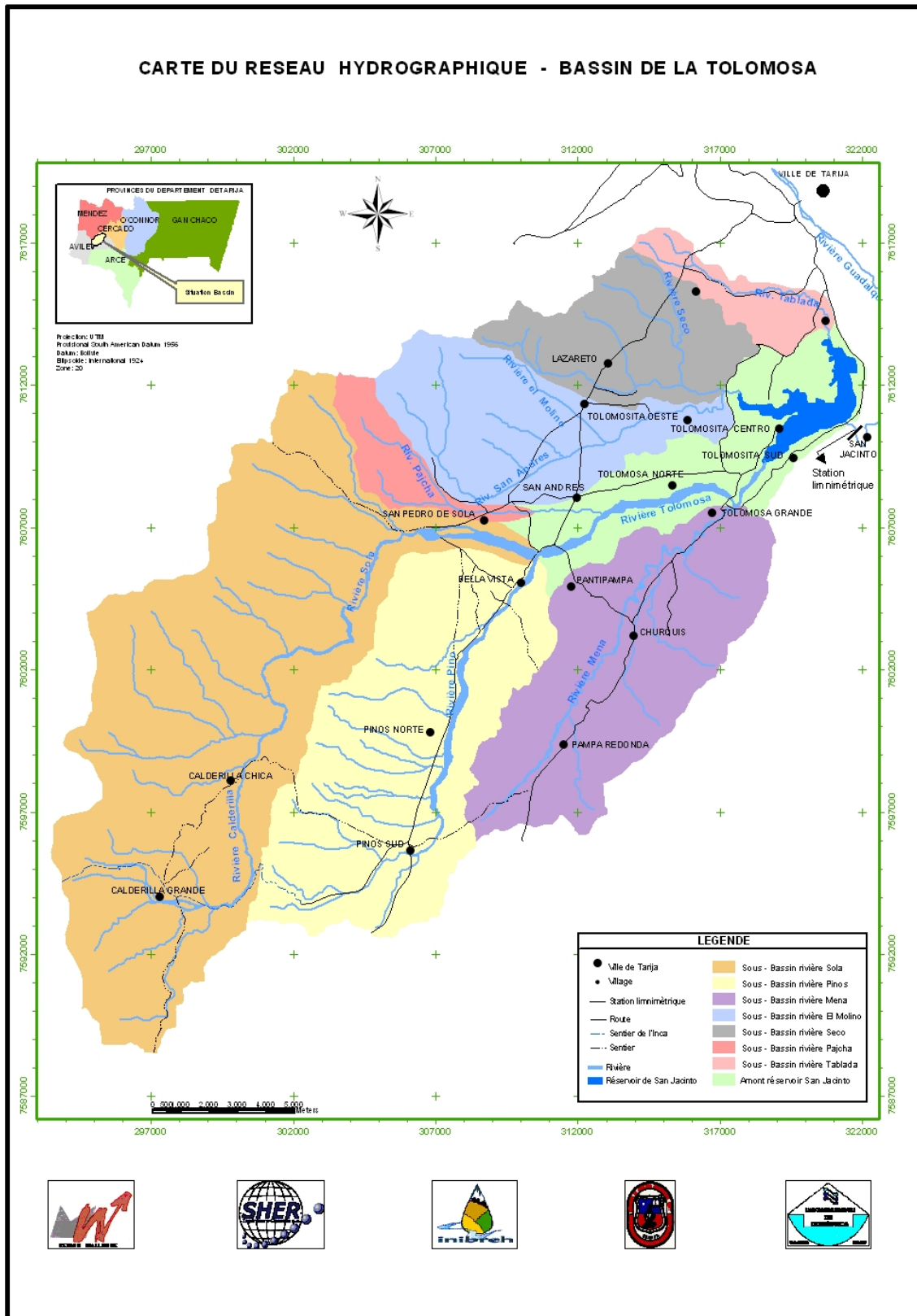
**TABLEAU I-4: sous-bassins et surfaces - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Surface	
	(ha)	(%)
Sola	15.276	35
Pinos	8.424	19
Mena	6.553	15
Molino	4.168	10
Seco	3.119	7
Pajcha	1.108	3
Tablada	1.101	3
Amont réservoir	3.463	8
Réservoir	460	1
<b>TOTAL</b>	<b>43.672</b>	<b>100</b>

Le reportage photographique de l'annexe I-1 série D illustre différentes rivières du bassin versant.

## I-2.3 CARTE GEOLOGIQUE

La carte géologique du bassin a pour but d'aider à l'interprétation du paysage géomorphologique et des formes dominantes d'érosion dans le bassin. La carte géologique du bassin versant se base directement sur les cartes géologiques nationales N° 6628 (Padcaya) et N° 6629 (Tarija) au 1/100.000 élaborées par le Service Géologique de Bolivie (GEOBOL, 1991 et 1982).



**FIGURE I-3: carte du réseau hydrographique - Bassin de la Tolomosa**

Les principales caractéristiques des formations géologiques qui couvrent le bassin versant sont résumées dans le tableau I-5 (Suárez, 1996; GEOBOL, 1991 et 1982; Ahlfeld et al., 1960).

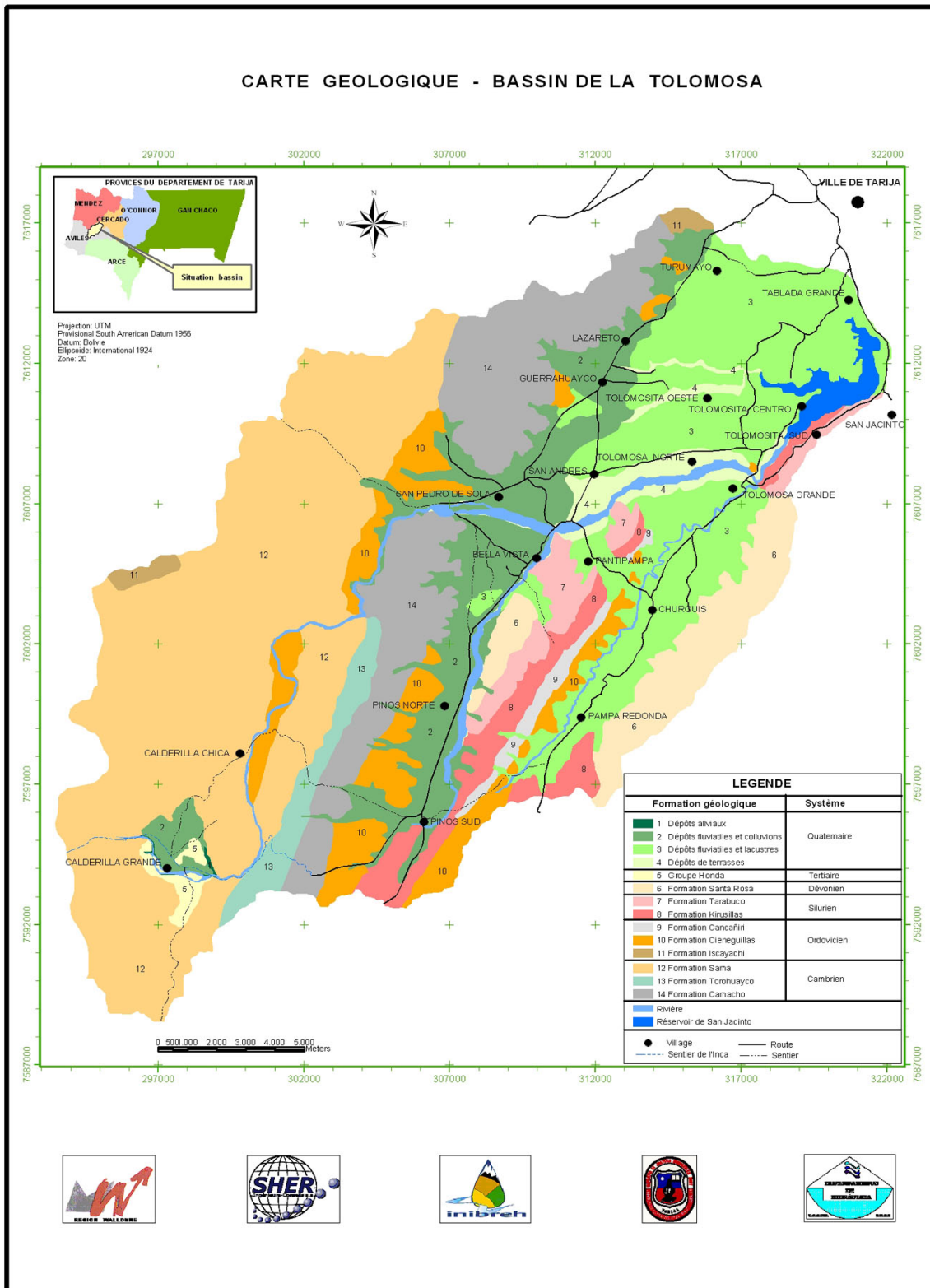
**TABLEAU I-5: formations géologiques (source: Suárez, 1996; GEOBOL, 1991 et 1982; Ahlfeld et al., 1960) - Bassin de la Tolomosa**

Système	Formation géologique					
	N°	Code	Type	Lithologie	ha	%
Quaternaire	1	Qa	Dépôts alluviaux	Matériaux meubles de galets, gravier, limon et argile	1.007	2
	2	Qcf	Dépôts fluviatiles et colluvions	Gravier, sable, limon et argile	5.068	12
	3	Qfl	Dépôts fluviatiles et lacustres*	Gravier, sable, limon et argile	7.827	18
Tertiaire	4	Qt	Dépôts en terrasses	Matériaux semi-consolidés de galets, gravier, limon et argile	930	2
	5	Tgh	Groupe Honda	Grès argileux et présence de tuf	246	1
Dévonien	6	Dsr	Formation Santa Rosa	Grès blanchâtre	2.238	5
Silurien	7	Stb	Formation Tarabuco	Intercalation de grès limoneux et de marnes argileuses grises et verdâtres	1.035	2
	8	Skr	Formation Kirusillas	Marnes argileuses et limon verdâtre	1.609	4
Ordovicien	9	Scc	Formation Cancañiri	Dépôts superficiels gris de bas de pente de charges variables et grès ferrugineux	384	1
	10	Oci	Formation Cieneguillas	Limonites et marnes argileuses grises obscures et présence de grès	2.902	7
	11	Ois	Formation Iscayachi	Grès, limonites et quartzites verdâtres	264	1
Cambrien	12	Esa	Formation Sama	Quartzites et grès gris et violacé	13.846	32
	13	Eth	Formation Torhuayco	Grès quartzitique blanchâtre, marnes argileuses et limonites verdâtres	916	2
	14	Eca	Formation Camacho	Conglomérats, grès quartzique	4.943	11
Autres	15				1.450	3
<b>TOTAL</b>					<b>43.672</b>	<b>100</b>

(\*) Dépôts renommés pour ses richesses paléontologiques (squelettes fossilisés de vertébrés comme le mastodonte).

Le tableau I-5 montre que le bassin versant possède des formations géologiques récentes (l'ère quaternaire caractérisée par les grandes glaciations) jusqu'aux plus anciennes comme l'ère cambrienne inférieure.

La localisation spatiale des formations géologiques est reportée sur la carte de la figure I-4.



**FIGURE I-4: carte géologique (source: Suárez, 1996; GEOBOL, 1991 et 1982; Ahlfeld et al., 1960) - Bassin de la Tolomosa**

L'étude des eaux souterraines de la vallée centrale de Tarija (CODETAR, 1980) indique que l'épaisseur de l'aquifère libre est d'environ 80 m dans les cônes de déjection des versants du bassin (zone de recharge). Vers l'est et le nord de la vallée, l'aquifère libre se transforme en aquifère confiné à cause de la présence de formations perméables couvertes par des sédiments fluvio-lacustres imperméables. Le premier horizon perméable que l'on peut considérer comme un aquifère confiné se trouve à une profondeur de 30 à 35 m.

A la limite entre les cônes de déjection et les sédiments fluvio-lacustres, le flux provenant de la zone de recharge ne peut plus suivre son cheminement souterrain dû à la réduction de la transmissivité hydraulique<sup>1</sup>, de sorte qu'une partie de l'eau jaillit en surface sous forme de sources (région de San Andres par exemple).

## I-2.4 CARTE GEOMORPHOLOGIQUE

La géomorphologie est l'étude du modelé du paysage en fonction des roches sous-jacentes. La carte géomorphologique permet de représenter les grands ensembles autour desquels s'organisent les lignes de pente, les écoulements d'eau, les replats, la forme des vallées et l'accumulation des matériaux qui forment progressivement les sols.

La carte géomorphologique du bassin est basée sur l'adaptation de l'information secondaire obtenue de la carte géomorphologique départementale au 1/250.000 (GEOBOL, 1991) et des études existantes (PEA, 2005; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001; PEA(a) 1998; PEA(b), 1998; Alzérreca et al., 1998; Espinoza, 1996; Derruau, 1995). Les informations complémentaires obtenues lors des sorties de terrain ont permis de mieux caractériser et délimiter avec plus de précision sur la carte certaines unités géomorphologiques du bassin versant (polygones) qui avaient préalablement été définies et décrites en suivant la méthodologie de l'International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) (Verstappen et al., 1991)<sup>2</sup> (Zonisig(a), 2001). L'approche ITC permet d'établir un bilan géomorphologique<sup>3</sup> relief-sol-roche issu de l'analyse du paysage comme une unité homogène en termes d'origine et de processus d'évolution tels que la sédimentation, l'érosion, la dissection et autres (le piémont se forme par exemple par des processus de sédimentation), permettant de définir et décrire les unités géomorphologiques rencontrées. Soulignons que l'introduction de l'influence du climat entre dans le cadre de la physiographie.

Les différentes unités géomorphologiques sont décrites par domaines géomorphologiques, par paysages selon l'origine géologique et son développement et par unités géomorphologiques avec ses caractéristiques de découpage et de relief.

La superficie des domaines géomorphologiques en pourcentage du bassin versant se trouve dans le tableau I-6.

**TABLEAU I-6: surface des domaines géomorphologiques (source: PEA, 2005; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001) – Bassin de la Tolomosa.**

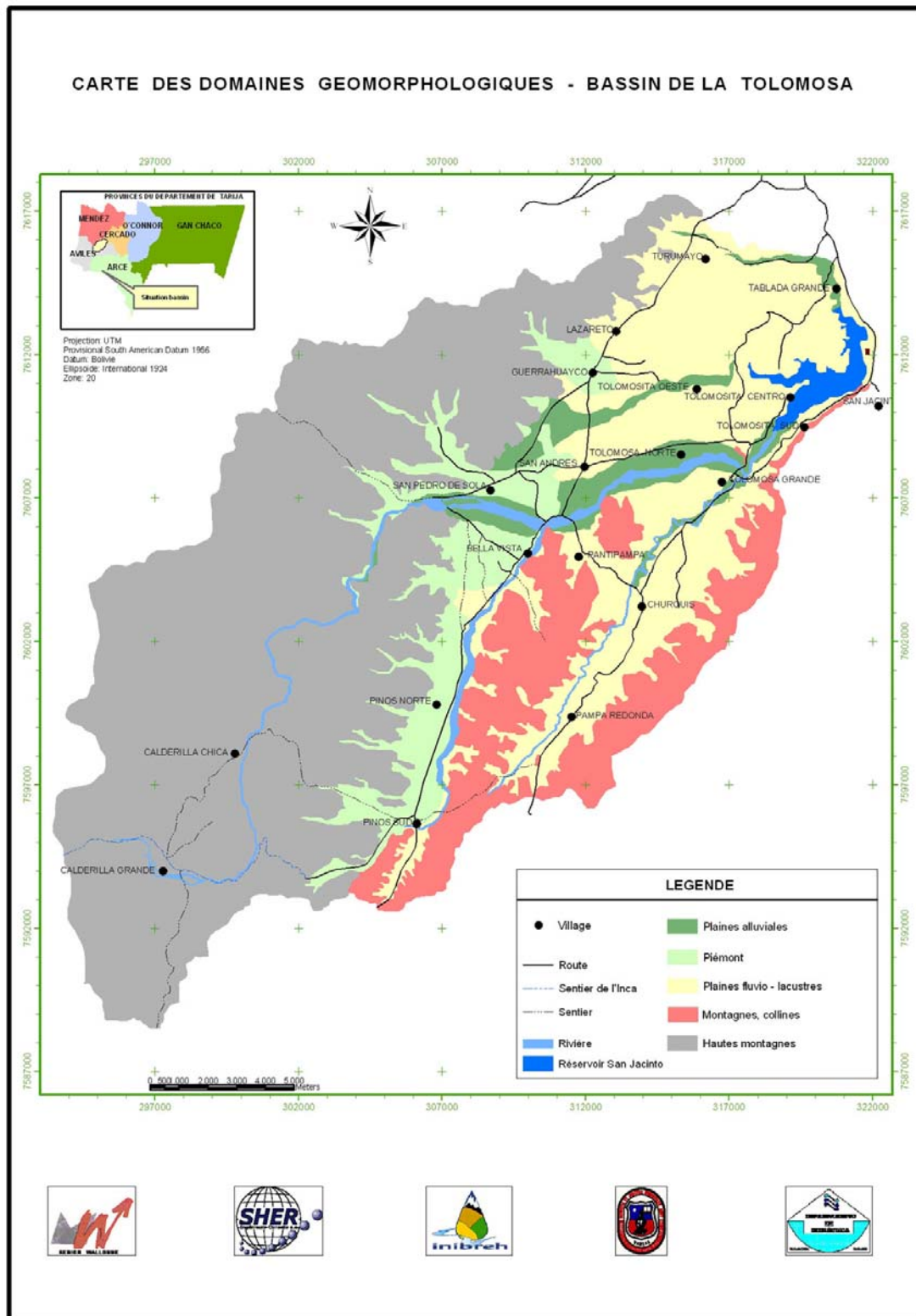
Domaine géomorphologique	Surface (% du bassin versant)
Haute montagne	51
Montagne et colline	12
Piémont	8
Plaine fluvio-lacustre	25
Plaine alluviale	4

La représentation spatiale des domaines géomorphologiques est reportée sur la carte de la figure I-5.

<sup>1</sup> Fonction du paramètre régissant le flux d'eau qui s'écoule par unité de longueur de la zone saturée d'un aquifère continu (dictionnaire français d'hydrogéologie; Castany et Margat, 1977)

<sup>2</sup> Méthodologie diffusée en Bolivie par le centre d'étude CLAS (Centro de Levantamientos Aerospaciales y Aplicaciones SIG) rattaché à l'Université Saint-Simon de Cochabamba

<sup>3</sup> Quaternaire principalement



**FIGURE I-5: carte des domaines géomorphologiques (source: PEA, 2005; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001)**

Le tableau I-7 décrit les domaines géomorphologiques, les paysages et les unités géomorphologiques du bassin versant ainsi que leurs surfaces (source: adapté de Zonisig(b), 2001 et Espinoza, 1996). Le reportage photographique de l'annexe I-1 série A illustre les paysages trouvés dans le bassin.

**TABLEAU I-7: domaines géomorphologiques, paysages et unités géomorphologiques et superficies (ha et % du bassin) (source: PEA, 2005 ; Zonisig(b), 2001; Espinoza, 2001) – Bassin de la Tolomosa**

Domaine géomorphologique	Paysage et éléments lithologiques	N°	Unité géomorphologique (sous-paysage)	Surface		
				(ha)	(%)	
Hautes montagnes et collines	Versant glaciaire	1	Cirque et versant rocheux	1.152	2,6	
		2	Complexe glaciaire	450	1,0	
		3	Moraine	2.068	4,7	
		4	Versant légèrement découpé	3.346	7,7	
		5	Versant découpé	683	1,6	
		6	Versant découpé à très découpé	2.529	5,8	
	Versant avec recouvrement du glaciais par colluvion (2) Eléments quartzeux, gréseux, cuirasse ferrugineuse Versant à éléments gréseux, argileux et tuf	Vallée glaciaire	7	Versant découpé à très découpé	468	1,1
			8	Versant très découpé	182	0,4
			9	Terrasse basse non découpée	149	0,3
			10	Terrasse haute modérément découpée	255	0,6
			11	Versant modérément découpé à découpé	2.008	4,6
			12	Versant très escarpé et découpé	2.298	5,3
			13	Versant découpé	3.417	7,8
			14	Versant découpé à très découpé	2.173	5,0
			15	Versant très découpé	1.279	2,9
			16	Versant légèrement découpé	567	1,3
			17	Versant modérément découpé	624	1,4
			18	Versant modérément découpé à découpé	834	1,9
			19	Versant découpé	597	1,4
			20	Versant très découpé	1.438	3,3
			21	Cime et versant légèrement découpés	1.043	2,4

Domaine géomorphologique	Paysage et éléments lithologiques	N°	Unité géomorphologique (sous-paysage)	Surface	
				(ha)	(%)
Piémonts	Piémont fluvioglaciale	22	Vallée étroite modérément escarpée	210	0,5
		23	Eventail de terrasses inclinées	366	0,8
		24	Vallée étroite peu inclinée	306	0,7
		25	Eventail de terrasses peu escarpées	197	0,5
		26	Piémont légèrement incliné	1.170	2,7
Plaines alluviales	Piémont alluvial	27	Eventail plat à légèrement incliné	878	2,0
		28	Eventail mal drainé	184	0,4
		29	Eventail légèrement incliné	537	1,2
		30	Terrasse moins récente	605	1,4
Plaines fluvio-lacustres	Terrasse alluviale	31	Terrasse récente	448	1,0
		32	Terrasse basse modérément découpée	278	0,6
		33	Terrasse actuelle légèrement découpée	190	0,4
		34	Vallée découpée à très découpée	298	0,7
		35	Vallée découpée	259	0,6
Plaines fluvio-lacustres	Cônes et petites vallées avec dépôts fluviatiles et lacustres	36	Eventail modérément découpé	639	1,5
		37	Replat peu incliné	211	0,5
		38	Replat non découpé	85	0,2
		39	Replat imparfaitement drainé	333	0,8
		40	Replat légèrement découpé	1.046	2,4
		41	Replat modérément découpé	1.455	3,3
		42	Replat découpé	3.435	7,9
		43	Replat très découpé	1.336	3,1
Plaines inondables			Plaine inondable	853	2
Autres				794	1,8
<b>TOTAL</b>				<b>43.672</b>	<b>100</b>

(1) Dépôts constitués d'éléments mal classés (roche terrigène) arrachés par érosion

(2) Dépôts à matériaux anguleux de bas de pente ayant subi un faible transport

(3) Les conglomérats sont des roches sédimentaires détritiques dont les éléments sont consolidés par un ciment

Ce tableau I-7 montre l'importance de la plaine fluvio-lacustre principalement formée de bad lands disséqués par des ravines profondes<sup>1</sup> et de replats fluvio-lacustres couvrant 22% du bassin versant. La dénivellation entre les replats et les fonds des ravines peut atteindre 15 m de hauteur en certains endroits (Demarcin, 2006).

Les terrasses alluviales surplombent la rivière, pouvant atteindre parfois une hauteur d'environ vingt mètres. Elles reposent sur un substratum tertiaire argilo-sableux et sont constituées de deux couches d'épaisseurs très variables, l'une grossière à la base et l'autre beaucoup plus fine au sommet.

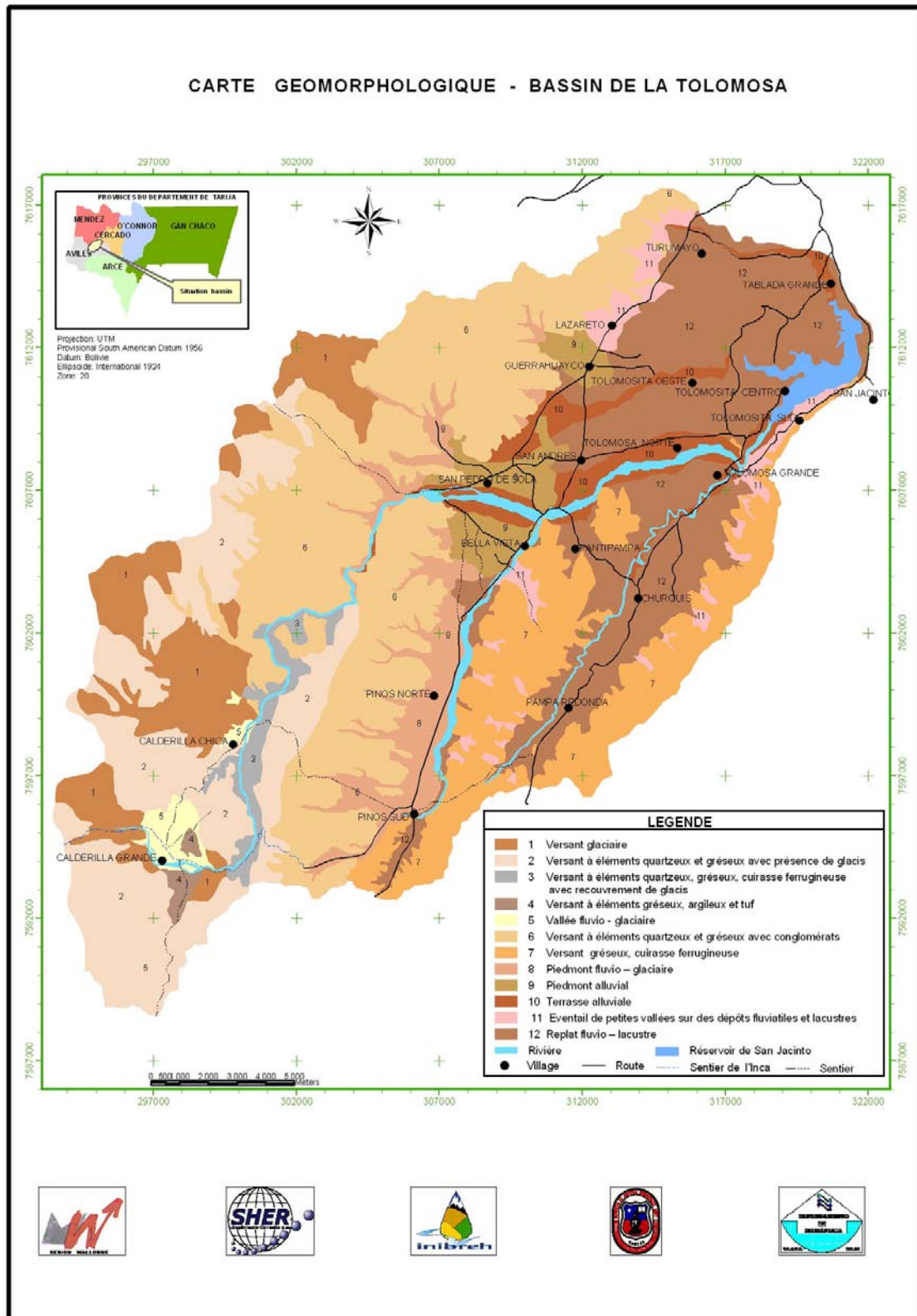
Les paysages de vallées glaciaires des hautes montagnes ont été creusés par les processus d'érosion glaciaire et fluvio-glaciaire. Les vestiges des formations glaciaires sont principalement les moraines, empilements de gravats et cailloux mélangés à la terre et laissés par le glacier.

La représentation des unités classées de paysages et la localisation spatiale sont reportées sur la carte de la figure I-6. Dans la réalité, ces paysages forment des combinaisons complexes, plus ou moins ordonnées, dont les délimitations ne sont pas toujours bien marquées.

La représentation des unités géomorphologiques classées et la localisation spatiale sont reportées sur la carte de la figure I-7.

---

<sup>1</sup> *Carcavas*



**FIGURE I-6: carte des unités de paysage (source: PEA, 2005; Zonisig 2001 et Espinoza, 2001 et 1996) – Bassin de la Tolomosa**

CARTE GEOMORPHOLOGIQUE - BASSIN DE LA TOLOMOSA

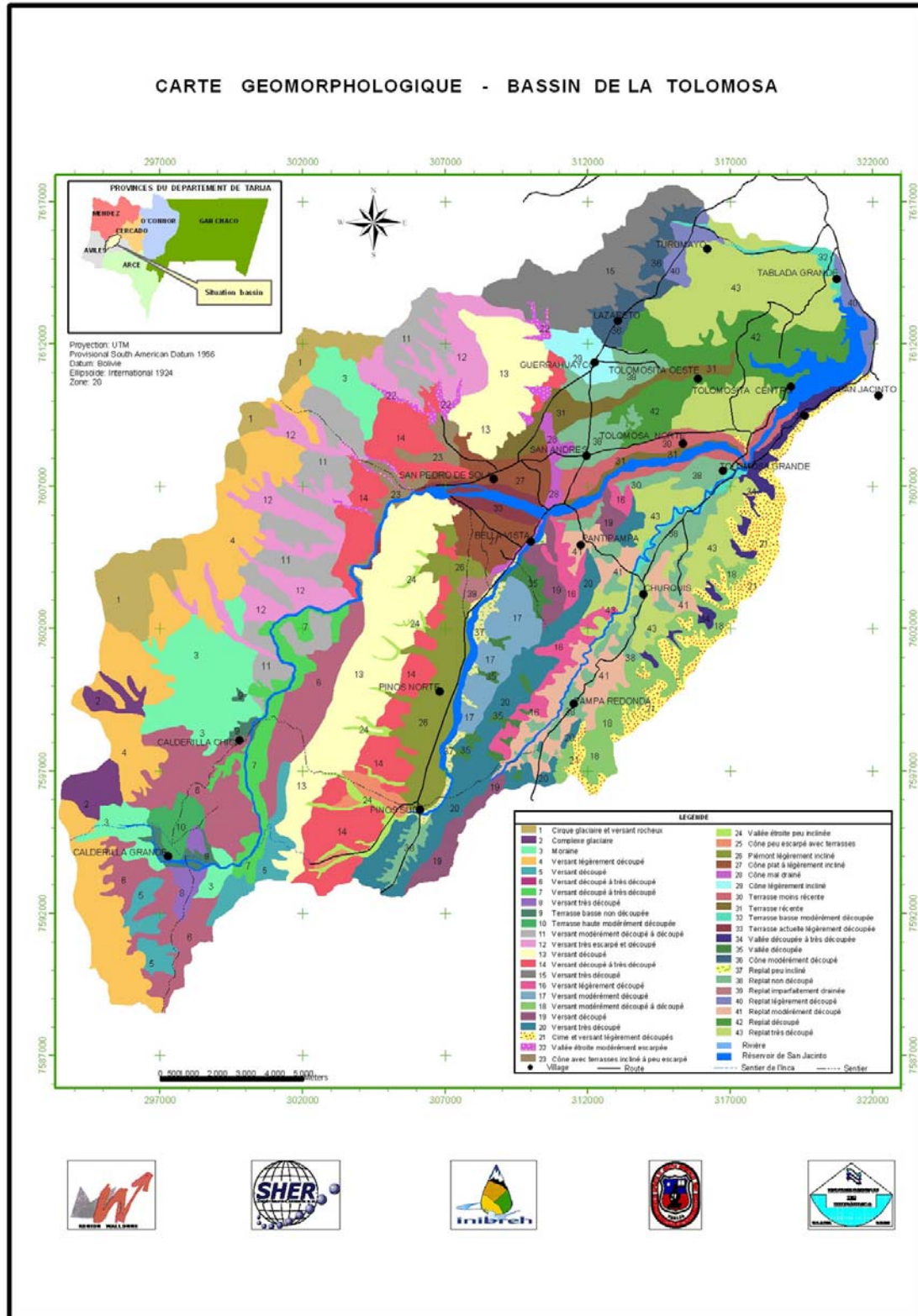


FIGURE I-7: carte des unités géomorphologiques (sous-paysages) (source: adapté de PEA, 2005; Zonisig 2001; Espinoza, 2001 et 1996) – Bassin de la Tolomosa

Ces domaines géomorphologiques et ensembles de paysages et sous-paysages forment des combinaisons complexes, plus ou moins ordonnées, faisant intervenir de nombreux processus déterminants, par exemple le ruissellement. Ces processus évolutifs qui doivent être appréhendés à des échelles d'espace et de temps compatibles, peuvent se présenter soit sous la forme d'une hydroséquence de l'amont vers l'aval (corniche, versant, piémont, glacis, vallée), soit sous la forme d'un ensemble discontinu, dont les éléments fonctionnent séparément avec des écoulements préférentiels du fait de la présence de plusieurs reliefs de commandement. Aussi, une difficulté rencontrée dans cette approche typologique est la prise en compte et la représentation des liaisons existantes entre ces différents ensembles, liaisons qui peuvent influencer le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

## **I-2.5 CARTE DES SOLS**

La carte des sols est basée sur l'information secondaire existante (PEA, 2005; PEA(a), 1998; PEA(b), 1998; Alzérreca et al., 1998; Galarza, 1997; Espinoza et al., 1995; CODETAR et al., 1989; Iriarte et al., 1978) et l'adaptation de la carte des sols du département de Tarija à l'échelle 1/250.000 (Zonisig(a&b), 2001). En plus de ces données disponibles, soixante nouveaux levés ont été effectués pour cette étude durant huit campagnes de quatre jours chacune pour enrichir et/ou préciser les unités cartographiques existantes qui s'inscrivent à l'intérieur d'un paysage et ses unités géomorphologiques définies précédemment (confer tableau I-7). Pour chaque unité géomorphologique sélectionnée, trois à quatre profils sont analysés et parfois davantage. En incluant l'information secondaire existante (Zonisig(b), 2001), un total de cent cinquante-cinq profils est décrit dans le bassin de la Tolomosa, ce qui revient à 0,4 profil par km<sup>2</sup>. La distribution spatiale et le nombre de profils analysés ont été choisis en fonction de la variation rencontrée dans le polygone qui représente sur l'image satellitaire l'unité géomorphologique, l'accessibilité et la position topographique.

Une fiche technique (Zonisig(a), 2001) a été remplie pour chacun des soixante nouveaux profils étudiés durant les sorties de terrain (confer annexe I-3). La classification taxonomique des sols utilisée est celle de la FAO (1989). Rappelons que ce système de classification comporte vingt-six ordres et prend en compte l'existence d'horizons de diagnostic, avec des noms empruntés à d'autres systèmes. La description des profils des sols est basée sur le guide émis par la FAO (1990). L'accent a été mis sur les caractéristiques physiques (charge en cailloux, structure, texture, etc.), l'appréciation possible de la fertilité (teneur en matière organique, couleur de la terre), du développement du profil et du drainage. La texture est estimée à l'œil et au toucher en humectant l'échantillon avec une pissette. La fraction limoneuse est souvent associée à la fraction argileuse. La profondeur du sol est estimée à partir de profils relevés dans des ravines ou creusés à la pioche et la bêche. Les composantes granulométriques et leur couleur sont estimées sur base de la *Revised Standard Color Charts for Soil Survey* de la FAO.

Les groupes des sols rencontrés dans le bassin ainsi que la description et le matériau parental sont donnés dans le tableau I-8.

**TABLEAU I-8: description générale des groupes des sols (FAO, 2001) – Bassin de la Tolomosa**

<b>Groupe des sols</b>	<b>Description</b>	<b>Matériau parental du bassin versant</b>
Cambisol (sol brun)	Sol peu évolué présentant un début de différenciation en horizons A, B, C. Le sol s'épaissit par des dépôts ou par produits d'altération qui restent sur place	Dérivé de texture moyenne ou fine provenant de roches de dépôts de colluvions, alluvions et éoliens
Fluvisol	Horizons A, C jeunes développés dans des dépôts alluviaux	Dépôts lacustres ou fluviaux récents
Leptosol	Sol jeune peu profond azonale	Roches dures qui empêchent la croissance racinaire
Régosol	Profil présent dans la couche altérée du sol Groupe taxonomique « fourre-tout »	Matériau meuble non consolidé, non sableux (arenosol) et peu profond (leptosol)
Phaeozem	Sol noir avec matière organique (contenu > 1,3%)	Matériau non consolidé basique sur versants
Lixisol	Sol ferrugineux fortement altéré où l'argile est lessivée de la surface vers un horizon d'accumulation	Matériau non consolidé à texture fine, fortement altéré et lessivé

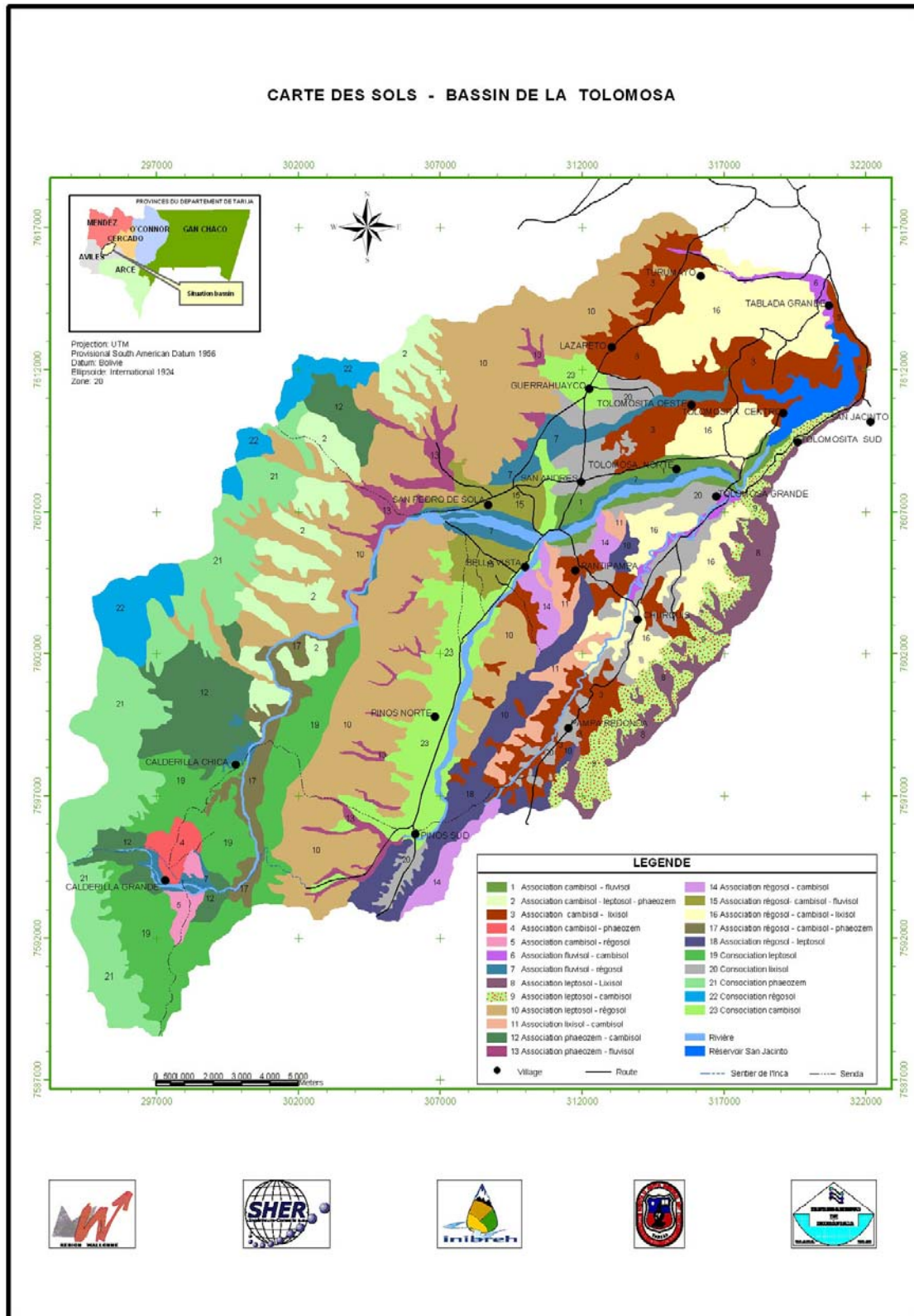
La méthode de cartogénèse utilisée dans ce travail agrège les types de sol en unités cartographiques non homogènes qui sont l'association qui contient deux ou davantage d'unités typologiques des sols associées géographiquement dans un même paysage et groupées pour des raisons pratiques de représentation cartographique, et la consociation si plus de 70% des sols appartiennent à la même unité typologique. Ces unités cartographiques (association et consociation) des sols du bassin ainsi que les superficies sont reprises dans le tableau I-9. Le reportage photographique de l'annexe I-1 série B illustre certains sols du bassin versant.

**TABLEAU I-9: unités cartographiques de la carte des sols et superficies (source: adapté de Zonisig(b), 2001 ; Espinoza, 1995) - Bassin de la Tolomosa**

N°	Unité cartographique	Superficie	
		(ha)	(%)
1	Association cambisol-fluvisol	649	1,4
2	Association cambisol-leptosol-phaeozem	2.156	4,6
3	Association cambisol-lixisol	4.008	8,6
4	Association cambisol-phaeozem	274	0,6
5	Association cambisol-régosol	196	0,4
6	Association fluvisol-cambisol	299	0,6
7	Association fluvisol-régosol	844	1,8
8	Association leptosol-lixisol	1.120	2,4
9	Association leptosol-cambisol	1.215	2,6
10	Association leptosol-régosol	10.515	22,5
11	Association lixisol-cambisol	609	1,3
12	Association phaeozem-cambisol	2.220	4,8
13	Association phaeozem-fluvisol	947	2,0
14	Association régosol-cambisol	641	1,4
15	Association régosol-cambisol-fluvisol	943	2,0
16	Association régosol-cambisol-lixisol	3.688	7,9
17	Association régosol-cambisol-phaeozem	503	1,1
18	Association régosol-leptosol	1.544	3,3
19	Consociation leptosol	3.449	7,4
20	Consociation lixisol	1.768	3,8
21	Consociation phaeozem	4.076	8,7
22	Consociation régosol	1.237	2,7
23	Consociation cambisol	2.335	5,0
24	Autres	1.443	3,0
<b>TOTAL</b>		<b>43.672</b>	<b>100</b>

Ce tableau I-9 indique que les sols dominants se retrouvent dans l'association leptosol-régosol suivie de la consociation phaeozem et l'association cambisol-lixisol. Ces sols dominants sont peu profonds, de texture moyenne avec présence de fragments gros et de type sablo-limoneux à limoneux avec la présence d'horizons argileux qui provoquent un ruissellement assez rapide. Dans les vallées, les sols sont plus profonds.

La représentation des unités classées ainsi que leur localisation spatiale est reprise sur la carte de la figure I-8.



**FIGURE I-8: carte des sols selon la classification taxonomique FAO (source: adapté de Zonisig(b), 2001; Espinoza, 1995) - Bassin de la Tolomosa**

## I-2.6 CARTE DES ETAGES ECOLOGIQUES

La carte des étages écologiques du bassin joue un rôle important dans la différenciation des unités d'occupation des terres. Elle a été établie sur base de la classification des étages écologiques définie par l'UNESCO (1973) et à partir de l'information secondaire existante (Zonisig(b), 2001; Agrosig, 2001; Beck, 1988; USAID, 1986).

Les niveaux d'altitude des étages écologiques correspondent aux écotones<sup>1</sup> rencontrés dans le bassin et qui se réfèrent principalement à des changements de paysage (vallée à montagne), de relief (plan à escarpé), de la végétation (herbacée à broussailles) et de l'occupation des terres (agricole à pâturage). L'étage montagneux qui est compris entre l'altitude de 1.820 m et 3.800 m, est subdivisé en trois sous-étages pour mieux appréhender les aspects topographiques, de paysages, climatiques et végétatifs du bassin.

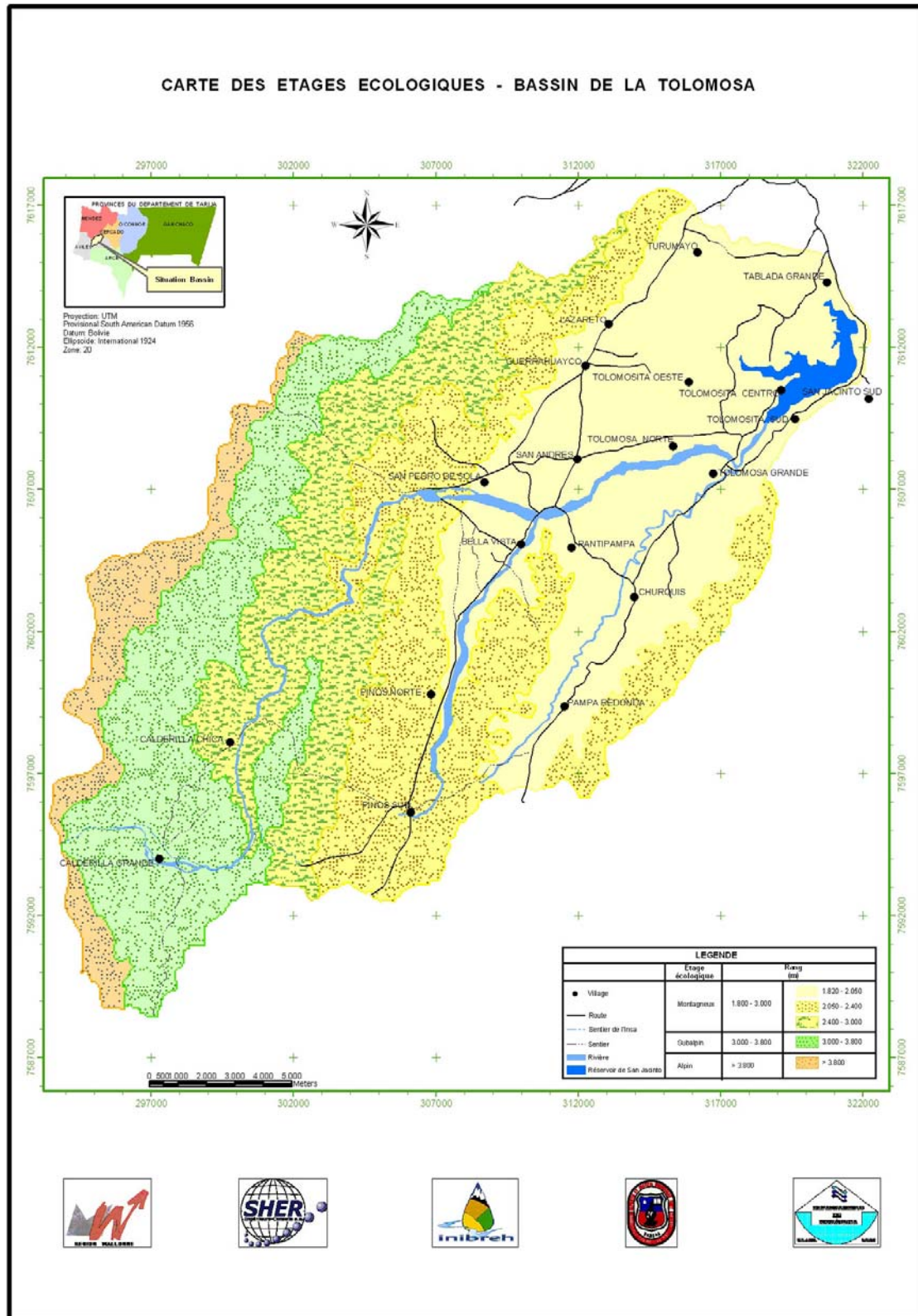
Le tableau I-10 donne les différents étages écologiques trouvés dans le bassin ainsi que leurs surfaces.

**TABLEAU I-10: altitude et surface en % du bassin versant des étages écologiques (source: Zonisig(b), 2001; Agrosig, 2001) – Bassin de la Tolomosa**

Géostructure	N°	Etage écologique	Altitude (m)	Surface (%)
Cordillère orientale	1	Montagneux	1.820–2.050	33
	2		2.050–2.400	24
	3		2.400–3.000	17
	4	Subalpin	3.000-3.800	19
	5	Alpin	> 3.800	6
<b>TOTAL</b>				<b>100</b>

On constate que les étages écologiques subalpin et alpin représentent 25 % de la surface du bassin. La représentation des unités classées et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure I-9.

<sup>1</sup> Zone de transition entre deux écosystèmes



**FIGURE I-9: carte des étages écologiques (source: Zonisig(b), 2001; Agrosig, 2001) - Bassin de la Tolomosa**

Soulignons que les étages écologiques ne coïncident pas nécessairement avec un type de climat ou un type de paysage. Par exemple, l'étage montagneux qui s'étend de 2.050 m à 2.400 m, possède différents paysages tels que ceux de vallées et de versants et, donc, des climats différents. En conséquence, la carte des étages écologiques ne tient compte que des caractéristiques dominantes.

## I-2.7 CARTE DU DEGRE D'EROSION

Le terme érosion se réfère au processus de décollement et transport des particules superficielles du sol, dans lequel interviennent des facteurs naturels (eau, vent, gravité, etc.) et/ou anthropiques. Ce processus peut concerner un mouvement individuel de particules ou d'une masse de particules. L'érosion hydrique, dont l'agent d'arrachement et de transport est l'eau, est le processus principal d'érosion rencontré dans le bassin (Espinoza, 2002). Elle se développe par l'impact des gouttes d'eau et le ruissellement direct sur la parcelle en emportant des particules de terre, une fois que les eaux de pluie ne s'infiltrent plus dans le sol. Le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace.

Dans le bassin versant existent des formes diffuses et concentrées d'érosion hydrique (PEA, 2004; Espinoza, 2002; Agrosig, 2001). L'érosion diffuse (en nappe) est issue du ruissellement diffus et correspond théoriquement à l'arrachage de couches minces du sol de manière uniforme sur toute la surface. L'arrachage des particules de terre vient de l'énergie des gouttes de pluie, lesquelles sont caractérisées par une vitesse de chute (fonction de la hauteur de chute et de la vitesse du vent) et par un certain poids (fonction du diamètre). Il n'est pas facile de détecter l'érosion en nappe, mais elle joue un rôle en créant par exemple des conditions propices pour d'autres formes d'érosion telles que des rigoles ou des ravines. Cette forme d'érosion est caractéristique des sommets du bassin versant ou à l'aval d'un obstacle. Au pied du bassin par contre, il s'agit d'accumulation.

L'érosion concentrée (linéaire) est la perte en sol par un ruissellement temporaire qui se concentre le long d'axes naturels d'écoulement temporaire (thalweg) et, par la suite, qui converge avec des effets de ravinement des terres plus au moins prononcés, pouvant transformer le paysage en bad lands. Soulignons que, dans cette étude, le thalweg est considéré comme une suite de points topographiquement bas alors que la ravine est définie comme une forme d'érosion.

Les degrés observés de l'érosion dans le bassin versant ont été regroupés en cinq niveaux:

- Apparemment sans érosion
- Erosion légère
- Erosion modérée
- Erosion sévère
- Erosion très sévère

La carte du degré d'érosion décrit la situation actuelle rencontrée dans le bassin et est basée sur l'adaptation de l'information secondaire existante (Vida Verde, 2006; Espinoza, 2002; Coppus, 2002; Agrosig, 2001; Zonisig(a&b), 2001; Valenzuela et al., 1998; PERTT, 1993; AASANA, 1980) et des observations sur le terrain par unité géomorphologique des aspects et des traces laissés par les processus d'érosion hydrique sur le sol et le paysage (griffe d'érosion, etc.). Nonante pour cent des sols du bassin versant sont affectés par des processus érosifs à des degrés divers, avec prédominance du ravinement<sup>1</sup> (PERTT, 1993). Le degré et les formes dominantes de l'érosion du bassin et leurs superficies respectives sont donnés dans le tableau I-11.

---

<sup>1</sup> *Gully erosion; erosión en cárcavas*

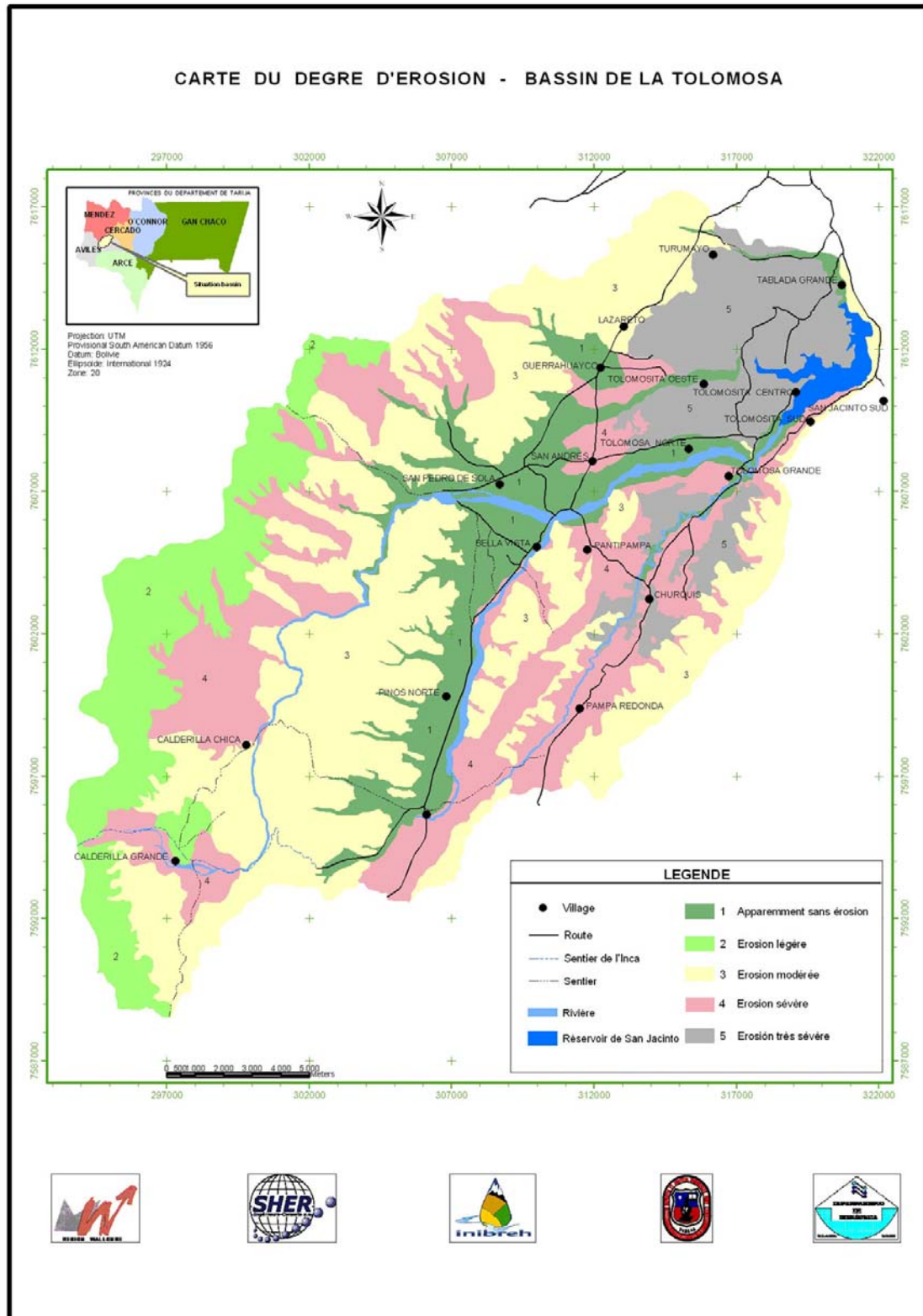
**TABEAU I-11: degré, forme dominante d'érosion, paysage et unité géomorphologique correspondante et surface (source: adapté de Espinoza, 2002 ; Zonisig(b), 2001)- Bassin de la Tolomosa**

N°	Degré d'érosion	Forme dominante d'érosion	Géomorphologie		Surface (ha)	Surface (%)
			Paysage	Unité (1)		
1	Apparement sans érosion	Apparement sans forme d'érosion diffuse, érosion locale des berges	Piémont fluvio-lacustre peu incliné Piémont alluvial peu incliné Terrasse alluviale peu inclinée	22, 23, 24, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33	5.377	12
2	Erosion légère	Erosion laminaire, nappe ravinante, petits effondrements de matériel grossier et formation de cônes	Versant glaciaire peu découpé Vallée fluvio-glaciaire	1, 2, 4, 10	5.211	12
3	Erosion modérée	Erosion laminaire, ravinement modéré; petits mouvements de masse; présence de petites marches	Versant à éléments quartzeux et gréseux avec présence de glaci Versant à éléments quartzeux, gréseux, cuirasse ferrugineuse avec recouvrement du glaci par colluvions Versant à éléments quartzeux et gréseux avec conglomérats Petite vallée et replat fluvio-lacustre	5, 6, 7, 1, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 36, 37, 40	17.296	40
4	Erosion sévère	Erosion laminaire, ravinement; mouvements de masse (gradins); boues; glissements  Erosion laminaire, ravinement; grandes ravines en voie de stabilisation	Versant glaciaire (moraine) Versant découpé à éléments gréseux, argileux et tuf Vallée fluvio-glaciaire découpée Cônes et petites vallées avec dépôts fluviaux et lacustres Replat fluvio-lacustre découpé	3, 8,9, 12  34, 35, 38, 41	7.898	8  10
5	Erosion très sévère	Erosion laminaire, ravinement très important (profondes ravines); présence d'effondrements (affouillement); mouvements de masse; boues; glissements; exposition de la roche-mère Village, réservoir et lits des rivières	Replat fluvio-lacustre très découpé	20, 42, 43	4.788	11
	Autres				1.456	3
	<b>TOTAL</b>				<b>43.672</b>	<b>100</b>

(1) Les numéros correspondent aux unités géomorphologiques du tableau I-7

Les résultats repris par le tableau montrent que 24% de la surface du bassin sont légèrement érodés. Par contre, 34 % de la surface souffrent d'un degré d'érosion sévère à très sévère, principalement dans les zones de replats fluvio-lacustres.

La représentation des unités de degré d'érosion et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure I-10.



**FIGURE I-10: carte du degré d'érosion (source: adapté d'Espinoza, 2002; Zonisig(b), 2001) - Bassin de la Tolomosa**

L'histogramme des classes de pente (confer histogramme de la figure IV-6) montre que plus de la moitié de la surface du bassin possède une classe de pente supérieure à 30%, et cela avec une majorité supérieure à 60% sur les versants de la chaîne montagneuse de Sama à l'ouest du bassin versant. Cette grande étendue à pente escarpée à très escarpée (falaise) pourrait favoriser les processus érosifs de dégradation des sols et du paysage en général. Cependant, en examinant la carte de la figure I-11 et le tableau I-12, on constate que la pente n'est pas toujours le facteur déterminant du degré d'érosion qui est aussi lié à la géomorphologie des paysages et à la géologie. En effet, les versants de Sama, grâce à la présence de paysages et d'éléments lithologiques relativement stables, ne présentent pas de problèmes graves d'érosion (confer carte de la figure I-10 qui n'indique qu'une érosion légère) malgré les fortes pentes alors que les replats fluviolacustres du nord-est du bassin souffrent de processus intensifs d'érosion en relation directe avec le type de paysage et les éléments lithologiques présents, malgré les pentes relativement faibles du terrain ne dépassant pas les 30 % (confer carte de la figure IV-5).

La vulnérabilité des sols à l'érosion dans la partie nord-est du bassin est principalement due aux caractéristiques des paysages fluviolacustres. Ces sols sédimentaires formaient à l'origine le fond d'un lac quaternaire, dont les eaux ont été drainées lors de l'ouverture de la gorge La Angostura (Coppus, 2002; Espinoza, 2002).

Soulignons que les formes d'érosion retrouvées dans le bassin versant ont été généralisées à la forme dominante dans les unités géomorphologiques analysées. Du point de vue cartographique, l'érosion hydrique est envisagée par rapport aux surfaces émettrices de particules solides, sans préjuger du devenir ultérieur de ces particules.

## **I-2.8 CARTE DE L'OCCUPATION DES TERRES**

Les catégories principales d'occupation des terres<sup>1</sup> utilisées par cette étude ont été définies par le Ministère du Développement soutenable et de l'Environnement (MDSMA, 1995) et adaptées par Zonisig (2001). Les données des classes d'occupation des terres proviennent de l'information secondaire existante (PEA, 2005 et 2004; Zonisig(a&b), 2001; Espinoza et al., 2001; Agrosig, 2000; Alzérreca et al., 1999 et 1992; PROBONA, 1995; Gutiérrez, 1989), de la carte géomorphologique et de la carte des sols établies précédemment et des informations complémentaires obtenues lors des sorties de terrain. Plus particulièrement, les observations de terrain ont permis de mieux repérer, identifier et décrire les formations végétales arborées, arbustives et herbacées (taille, forme, proportion les unes par rapport aux autres) des classes d'occupation des terres, en prenant aussi soin de différencier la végétation spontanée de la végétation cultivée et les espèces pérennes par rapport aux annuelles.

Les 17 classes d'occupation des terres du bassin versant de la Tolomosa sont reprises dans le tableau I-12. Le reportage photographique à l'annexe I-1 série E illustre certaines classes d'occupation des terres du bassin.

---

<sup>1</sup> Land use

**TABLEAU I-12: description, superficie en hectare et en pourcentage du bassin versant des classes d'occupation des terres (source: adapté de PEA, 2004; Zonisig(b), 2001; Espinoza et al., 2001; PROBONA, 1995) - Bassin de la Tolomosa**

N°	Classe	Description	Superficie		Etage écologique (m)
			(ha)	(%)	
1	AA2	Agriculture intensive irriguée avec cultures annuelles et pérennes (fruits)	4.073	9,3	1.820-2.050
2	AA1	Agriculture extensive pluviale avec cultures annuelles et pérennes (fruits)	2.166	4,9	1.820-2.050
3	Aa	Zone de cultures avec rangées d'arbres plantées en bordure	3	0,01	1.820-2.050
4	GEc-mb	Pâturage extensif parmi broussailles xéromorphiques ( <i>matorral</i> ) limité aux bovins	3.597	8,2	1.820-2.050
5	GE-mp	Pâturage extensif permanent parmi végétation herbacée et arbustive	1.178	2,7	1.820-2.050
6	GE-c	Pâturage permanent en zone marécageuse	178	0,4	1.820-2.050
7	GE-dNE	Pâturage extensif dispersé en zone érodée avec caprins et ovins	1.549	3,5	1.820-2.050
8	GE-ad	Pâturage extensif et cultures agricoles dispersées	2.427	5,6	1.820-2.050
9	GE-mx	Pâturage extensif avec élevage mixte	5.211	11,9	2.050-2.400
10	GE-bo	Pâturage extensif avec élevage de bovins et ovins	12.487	28,6	Subalpin
11	GE-b	Pâturage extensif avec élevage de bovins	5.686	13,0	Subalpin
12	GE-o	Pâturage extensif avec élevage d'ovins	408	0,9	2.050–2.400
13	Ge-b-EVI	Pâturage extensif avec élevage de bovins et récolte de bois de chauffe (sylvo-pastoral)	386	0,9	2.050–2.400
14	S-EVI	Pâturage extensif avec bovins et récolte de bois de chauffe (sylvo-pastoral)	959	2,2	2.050–2.400
15	S-boc-L	Pâturage extensif avec bovins, ovins et caprins et récolte de bois de chauffe (sylvo-pastoral) parmi broussailles sur versant	1.707	3,9	2.400–3.000
16	Pf	Bois de culture	80	0,2	1.820–2.050
17	NR-fs	Affleurement rocheux et faune sylvestre	724	1,7	Alpin
	Autres	Plan d'eau, etc.	853	1,9	
<b>TOTAL</b>			<b>43.672</b>	<b>100</b>	

avec:

GE	Pâturage extensif	NR	Affleurement rocheux	mx	Mixte
a	Arbre	EVI	Extraction de bois	o	Ovin
p	Pâturage	fs	Faune sylvestre	c	Permanent
d	Dispersé	m	Broussaille ( <i>Scrub; matorral</i> )	b	Bovin
NE	Terre érodée	N	Sans usage	U	Urbain
S	Présence d'arbres (sylvo) et abrutage (pastoral)				

L'analyse du tableau I-12 montre que l'agriculture annuelle et pérenne couvre 15% de la superficie du bassin versant et l'élevage extensif (GE), environ 80% avec prédominance des bovins sur une superficie de 35.000 ha environ. L'agriculture intensive irriguée s'étend sur 10% environ du bassin. Finalement, on trouve sur 5% environ de la superficie du bassin une activité pastorale couplée avec l'extraction de bois à usage domestique (bois de chauffe, propriété médicinale, teinture de tissus).

La représentation et la localisation spatiale des 17 unités se trouvent sur la carte de la figure I-11.

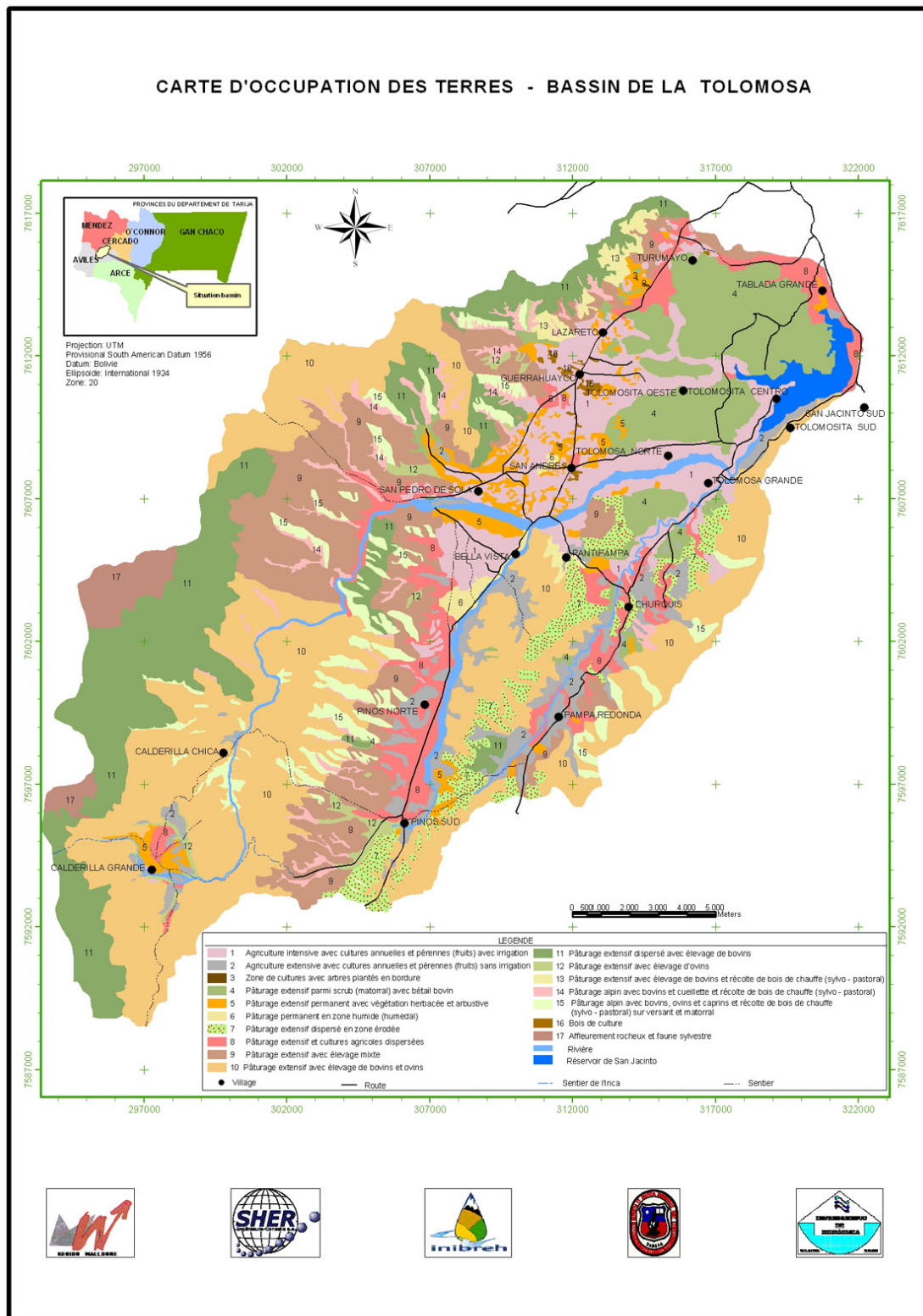


FIGURE I-11: carte des classes d'occupation des terres - Bassin de la Tolomosa

## **DEUXIEME PARTIE**

### **MODELE HYDROLOGIQUE ET BASE DE DONNEES**



## II-1 CYCLE DE L'EAU

L'hydrologie d'un bassin versant comprend une série d'évènements regroupés en un ensemble de processus faisant partie du cycle de l'eau. Les processus considérés en l'occurrence sont ceux de la phase terrestre du cycle de l'eau, c'est-à-dire ceux qui contrôlent notamment les flux parvenant in fine à la rivière. Les mécanismes régissant le cycle de l'eau ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants. Il est habituel de diviser le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant en eaux de surface et eaux souterraines. De plus en plus souvent, le sous-sol «non saturé en eau» est identifié séparément sous le terme de zone vadose pour le distinguer de la zone saturée des eaux souterraines.

Le cycle de l'eau est sujet à des processus complexes et variés tels que les précipitations, l'interception, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), le ruissellement, l'infiltration, la percolation, le stockage et les écoulements souterrains. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique.

La précipitation non interceptée (par les végétaux ou autres) qui atteint le sol, s'écoule jusqu'aux cours d'eau soit en surface (ruissellement direct) ou s'infiltré dans le sol. Il y a stockage temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol utilisable par les plantes et percolation pour contribuer aux écoulements de sub-surface et au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Ces écoulements (sauf exportation hors du bassin par pompage ou autre) rejoignent in fine le cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration à partir des plantes complètent le cycle.

La phase terrestre du cycle de l'eau peut s'écrire de la forme suivante pour une épaisseur de sol donnée, sur une période donnée et pour un intervalle de temps déterminé exprimé en jours:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=0}^t (R_i - Q_r - E_i - T_i - P_i - Q_{gw})$$

Avec ( $0 < i < t$ ):

- SW<sub>t</sub>: stock en eau du sol au temps t (mm)
- SW<sub>o</sub>: teneur initiale en eau du sol au temps initial t<sub>o</sub> (mm)
- R<sub>i</sub>: hauteur de précipitation du jour (mm)
- Q<sub>r</sub>: hauteur de ruissellement superficiel du jour (mm)
- E<sub>i</sub>: évaporation réelle du sol du jour (mm)
- T<sub>i</sub>: transpiration réelle du jour (mm)
- P<sub>i</sub>: hauteur de percolation du jour (mm)
- Q<sub>gw</sub>: hauteur d'écoulement de base (mm)

La figure II-5 présente un diagramme schématique du cycle hydrologique terrestre.

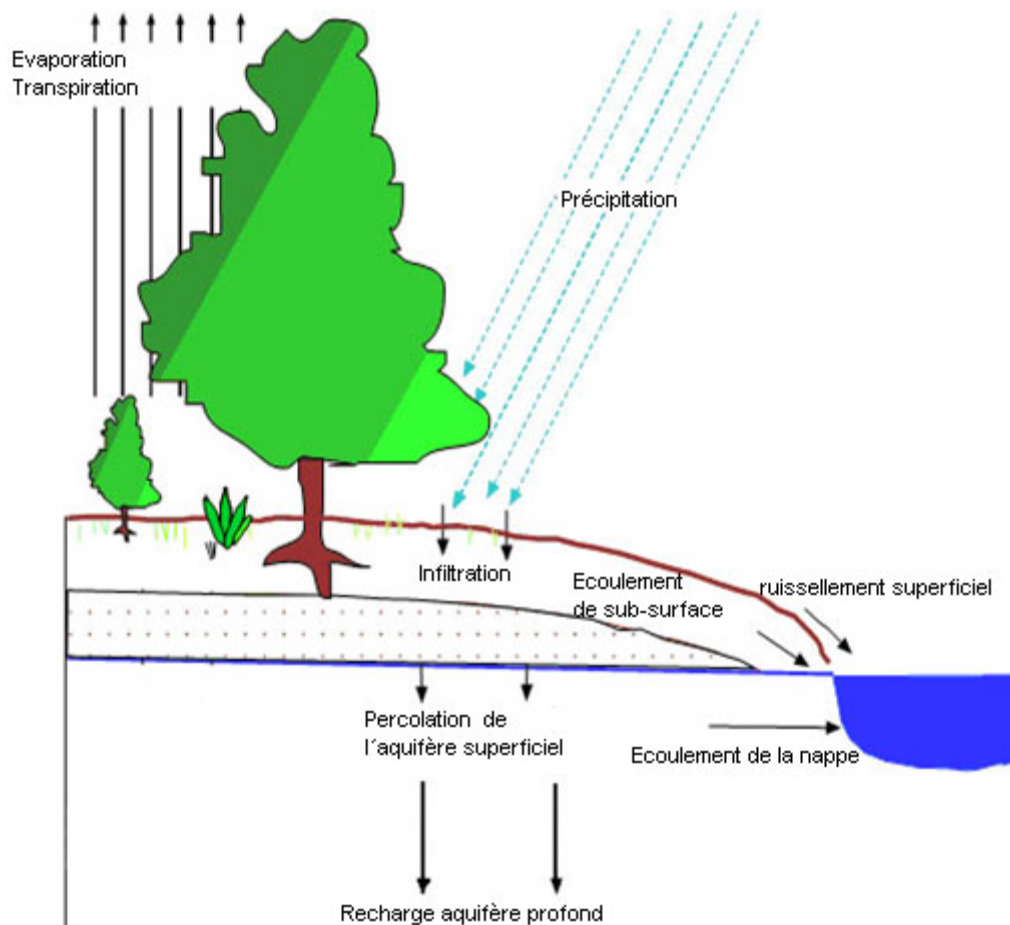


FIGURE II-1: schéma du cycle hydrologique terrestre de l'eau (source: Neitsch et al., 2002)

## II-2 LE MODELE HYDROLOGIQUE

La modélisation hydrologique revient à la traduction mathématique du cycle de l'eau, conceptualisé et simplifié sous forme d'équations de production et des fonctions de transfert.

Les objectifs de la modélisation sont multiples: prévision (crues, sécheresse, gestion de l'irrigation, d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ou simulation (scénarios, changements climatiques, aménagements de bassins). Rappelons que l'objectif de la modélisation hydrologique envisagée du bassin versant de la Tolomosa est de quantifier les termes du bilan en eau en vue de permettre l'analyse et la comparaison de la réponse hydrologique du bassin vis-à-vis de changements dans l'occupation des terres (scénarios) et, à terme, de proposer une allocation des ressources hydriques et d'en développer la valorisation.

### II-2.1 CHOIX DU MODELE

Il existe une très grande variété de modèles hydrologiques, car les processus pris en compte et l'approche adoptée pour les conceptualiser diffèrent selon les auteurs. Les modèles les plus complets prennent en compte les processus verticaux et latéraux. Dans la dimension verticale, les principaux flux sont l'interception, l'évapotranspiration, l'infiltration, la percolation au sein du profil de sol et la percolation profonde vers les aquifères. Dans la dimension latérale, il s'agit surtout de conceptualiser le ruissellement de surface et les écoulements de sub-surface.

Les modèles peuvent simuler explicitement le transfert de la lame d'eau au sein même du réseau hydrographique ou faire l'hypothèse qu'aucune modification n'a lieu au cours du cheminement de l'eau dans le réseau.

Pour modéliser les processus de production et de transfert vers le cours d'eau, les hydrologues ont développé un très grand nombre d'outils. L'abondance des modèles témoigne de la variété des

approches possibles pour conceptualiser ces processus qui dépendent aussi de l'objectif de l'étude. Différents critères peuvent être utilisés pour distinguer les modèles entre eux. N'ayant pas pour but de répertorier et classer tous les outils existants, nous proposons ici quatre critères qui paraissent pertinents pour classer la plupart des modèles existants.

Un premier critère est l'échelle spatiale du modèle. Le découpage spatial permet de distinguer tout d'abord les modèles globaux (*lumped model*) avec une seule « unité de production » où la description du bassin versant utilise des valeurs moyennes représentatives du milieu physique. Les modèles distribués (par exemple MIKE SHE et TOPMODEL) considèrent par contre que le bassin n'a pas le même fonctionnement en tout point et le découpent en unités ou classes homogènes reliées entre elles et définies par des caractéristiques propres. Le fonctionnement hydrologique est considéré comme identique dans chaque unité ou classe. Chaque modèle a ses propres critères pour définir les unités ou classes hydrologiques (critères topographiques, critères de couverture sol/végétation, etc.). Aussi, ces modèles sont complexes vu la nécessité de caractériser chaque unité et de prévoir les relations entre celles-ci. Ils demandent un nombre considérable de données à récolter et contiennent l'inévitable approximation qui en résulte. Il existe une catégorie intermédiaire où l'on trouve les modèles semi-distribués (SWAT: Srinivasan et Arnold, 1994; SWRRB: Williams et al., 1985).

La discrétisation temporelle permet de ranger les modèles en deux catégories suivant que ceux-ci prennent en compte un épisode pluvieux particulier (*single event*) ou une période de temps plus longue, telle que l'année ou plus.

La formulation des processus verticaux et horizontaux permet également de différencier les modèles. Dans un premier groupe, la description du mouvement de l'eau dans le sol et à sa surface se base, pour des mouvements en milieu saturé, non saturé et pour le ruissellement superficiel, sur des équations théoriques simplifiées, dont la résolution s'effectue par la méthode des différences finies; ces équations n'étant plus linéaires, les solutions analytiques n'existent que pour des cas particuliers. Dans le deuxième groupe de modèles, la formulation des processus utilise des représentations conceptuelles permettant leur simplification, mais fonctions de paramètres physiques. Un modèle conceptuel considère le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Par exemple, SWAT utilise certains modules conceptuels comme le module de sol qui s'apparente à un réservoir pour simuler les écoulements verticaux dans le sol.

Enfin, le dernier critère s'attache à la nature probabiliste ou déterministe des variables intégrées au modèle. Nous entendons par modèles probabilistes des modèles affectant aux variables des valeurs suivant une distribution donnée. Par modèles déterministes, nous entendons ceux qui cherchent à affecter une valeur à une variable en fonction des données de terrain. L'utilisation d'un modèle probabiliste est adaptée si l'objectif n'est pas une connaissance réaliste du fonctionnement du bassin, mais une reproduction optimale de ses variables de sortie (souvent, seul le débit est analysé). Ils sont typiquement employés en prévision. Les modèles déterministes sont adaptés à des analyses dont le but est plutôt la compréhension des processus menant à un certain débit et d'exploiter les informations disponibles a priori.

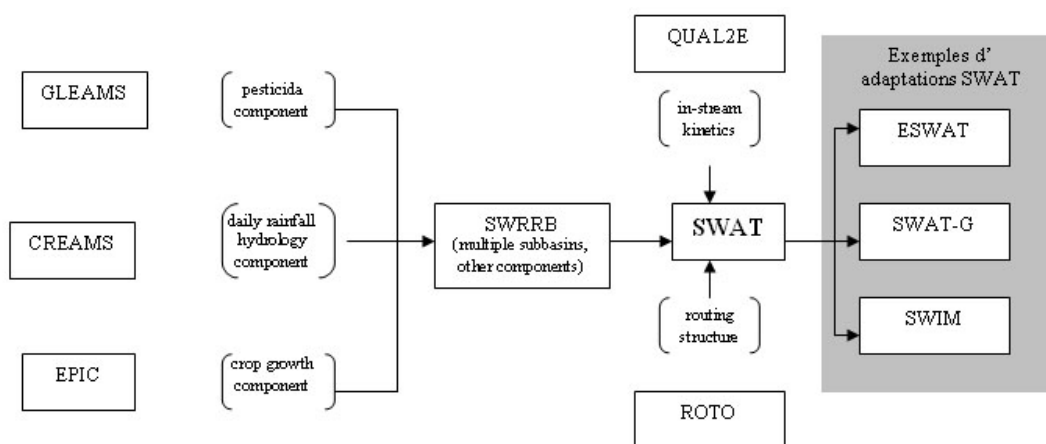
Il existe encore d'autres critères de différenciation des modèles tels que les modèles continus ou événementiels, descriptifs, etc.

Se pose maintenant la question du choix d'un modèle adapté à nos objectifs et notre contexte. Pour mener à bien cette étude et atteindre les objectifs proposés, le modèle doit posséder un certain nombre de caractéristiques. Tout d'abord, la forte diversité du relief, du climat et de la géomorphologie, et donc du comportement hydrologique, a imposé le choix d'un modèle distribué, capable de calculer la contribution hydrique de différentes unités de terrain et de changements possibles dus, par exemple, à la mise en œuvre de projets de développement (scénarios). Soulignons cependant que le manque d'information exclut un modèle complètement distribué. Le modèle à choisir doit être continu, c'est-à-dire simuler des séries de données sur plusieurs années avec un pas de temps régulier (jour). Enfin, il doit permettre la compréhension des processus menant à un certain débit en exploitant les informations disponibles.

Le choix s'est alors porté sur le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) version 2000 (Arnold and al., 1995), qui est disponible gratuitement sur le Web<sup>1</sup>. Cette version était la plus récente lors du démarrage de l'étude. La théorie du modèle est décrite par Neitsch et al. (2002).

## II-2.2 MODELE SWAT

Le modèle SWAT est issu de la combinaison de deux modèles. Le modèle CREAMS (modèle hydrologique à l'échelle parcellaire; Knisel, 1980) a d'abord été étendu à l'échelle du bassin, devenant ainsi le modèle SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basin; Arnold et al., 1990) intégrant également une composante érosion (Williams, 1990) et eau souterraine (GLEAMS; Leonard et al., 1987). SWRRB a été combiné au modèle ROTO (modèle de routage de l'eau et des sédiments; Arnold, 1990) et QUAL2E (Brown et al., 1987) pour former le modèle SWAT. Ainsi, SWAT bénéficie de l'historique des modèles dont il est issu (développement et validation). Le modèle a été progressivement amélioré en intégrant les développements de différents auteurs: la modification de la formulation de la percolation au sein du profil de sol dans SWAT-G (Eckhardt et Arnold, 2001); un nouveau découpage des unités de production dans SWIM (Krysanova et al., 1998); ESWAT ajoute un module de qualité de l'eau et modifie plusieurs modules préexistants (Vandenberghe et al., 2002). Le schéma de la figure II-2 montre le développement historique du modèle SWAT, y compris certaines adaptations (source: Gassman, 2007).



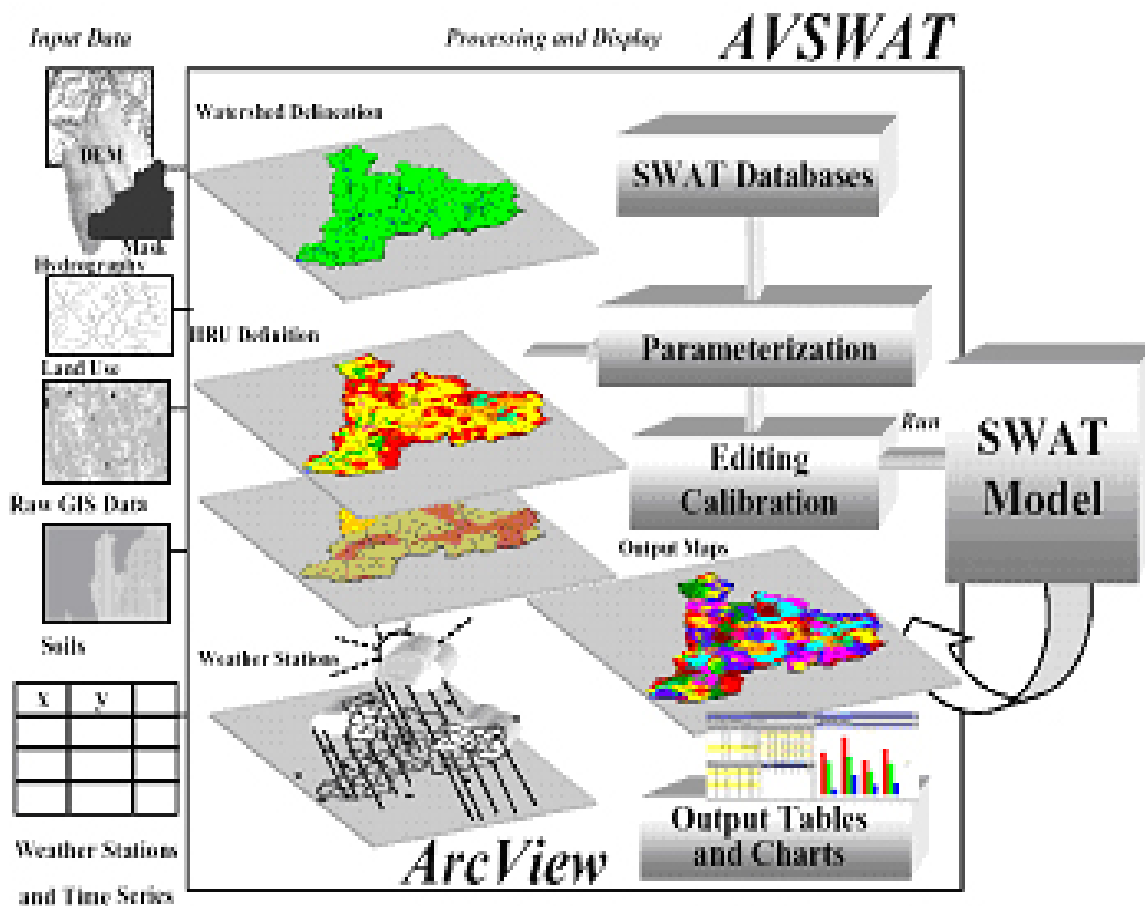
**FIGURE II-2: schéma du développement historique du modèle SWAT (source: Gassman, 2007)**

SWAT est un modèle physiquement basé, synthétique (ou conceptuel), déterministe (relation de cause à effet entre précipitations et débits du cours d'eau) au pas de temps journalier. Il est semi-distribué, car il inclut en plus de données physiquement réalistes des aspects statistiques et/ou stochastiques (probabilités) en complément ou en développement. Outre la simulation hydrologique proprement dite, SWAT intègre également la simulation de l'érosion des terres et de la production de sédiments, ainsi que des procédures de gestion des terres, y compris la croissance des récoltes, les flux de nitrate et phosphore, etc. Seules les informations liées à l'hydrologie, la croissance des plantes et à la production de sédiments sont utilisées dans cette thèse.

L'utilisation conjointe de l'extension du Système d'Information Géographique (SIG) ArcView AvSWAT) permet le prétraitement des données topographiques et convient pour le stockage, la gestion et la visualisation des données spatialement distribuées sous forme, par exemple, de cartes thématiques. Pour chaque simulation du bilan en eau effectuée par le modèle, cette interface permet de créer une nouvelle série de cartes et de tableaux de résultats (DiLuzio, 2002). AvSWAT possède huit modules de travail, dont celui de la délimitation du bassin versant, de la définition des unités hydrologiques de calcul et de la préparation des cartes et des tableaux de résultats. Les données à fournir sont le modèle numérique de terrain (MNT), les cartes des sols et couvertures végétales, les données climatiques et celles liées au réseau hydrographique.

Le schéma de conceptualisation de la modélisation du bassin versant avec l'interface AvSAWAT est présenté de la figure II-3.

<sup>1</sup> www.brc.tamus.edu



**FIGURE II-3: schéma de conceptualisation et présentation des données via l'interface AvSWAT du modèle SWAT (source: Neitsch et al., 2002)**

Pour chaque unité élémentaire de calcul (appelée HRU ou *Hydrologic Response Unit* dans le schéma de conceptualisation), les paramètres spécifiques de couverture, de topographie et de sol doivent être définis. Pour chaque sous-bassin, les paramètres topographiques, climatiques et de surface sont à spécifier. Enfin, pour le bassin entier, les paramètres de surface et des paramètres climatiques sont à renseigner.

De nombreux bassins versants ont été étudiés avec succès en utilisant ce modèle hydrologique, entre autres aux Etats-Unis et en Europe (Arnold et al., 1996; Arnold et al., 1998; Srinivasan et al., 1998; Arnold et al., 1999; Arnold et al., 2000; Hernandez, 2000; Saleh et al., 2000; Spruill, 2000; Santh et al., 2001; Heuvelmans, 2005; White, 2005; Tripathi, 2006; Gassman et al., 2007). SWAT a été validé dans des contextes et à des échelles spatio-temporelles variés: sur des bassins de quelques km<sup>2</sup> à quelques centaines de km<sup>2</sup> sur une période annuelle, mensuelle et journalière (Arnold et Allen, 1996; Arnold et al., 2000; Bingner, 1996; King et al., 1999; Spruill et al., 2000); sur des bassins agricoles aux Etats-Unis pour analyser des problèmes de pollution, d'érosion ou d'aménagement (Chanasyk et al., 2003; Kirsh et al., 2002; Saleh et al., 2000; Whittaker et al., 2003); en climat semi-aride à l'échelle journalière et mensuelle (Arnold et al., 1999; Hernandez, 1998; Hernandez, 2000; Muttiah et Wurbs, 2002).

## II-2.3 SPATIALISATION

L'étude des processus hydrologiques se base sur la segmentation de l'espace en unités homogènes appelées Unité de Réponse Hydrologique (HRU *Hydrologic Response Unit*) qui représentent une combinaison unique entre le sol et la couverture végétale.

Cette segmentation de l'espace en unités hydrologiques HRU correspond à un découpage en zones caractérisées par un comportement ou un fonctionnement hydrologique spécifique et homogène qui

est la résultante des processus hydrologiques qui régissent chaque unité. Les différents flux d'eau horizontaux et verticaux sont calculés de manière indépendante pour chaque HRU.

Une HRU n'a pas une situation spatiale explicite dans le sous-bassin, mais correspond à un regroupement de superficies qui se présente sous forme de plages discontinues et de tailles variables. Ces HRU ne sont pas nécessairement des parcelles adjacentes et sont qualifiées par de nombreux auteurs comme un bassin virtuel. Un (sous-)bassin possède au minimum une HRU. Le nombre de HRU par sous-bassin est fonction d'un seuil de superficie imposé par l'utilisateur.

La position du point d'observation des données débitométriques journalières est fixe et correspond à l'exutoire du bassin versant. Il n'y a donc pas de dimension spatiale dans ce cas. Pour un modèle semi-distribué, le manque de cette dimension spatiale peut nuire à l'efficacité de la modélisation et est plus approprié à un modèle de type global.

## II-2.4 FONCTIONS DE PRODUCTION DES FLUX D'EAU

Le modèle hydrologique SWAT ne simule que des flux d'eau verticaux et latéraux en zone (temporairement) saturée.

### II-2.4.1 FLUX VERTICAUX

Dans la dimension verticale, les cinq principaux transferts sont les suivants:

- Interception
- Infiltration de l'eau dans le sol
- Percolation de l'eau au sein du sol
- Transpiration des végétaux
- Evaporation du sol

La figure II-4 présente une schématisation des principaux flux verticaux pris en compte par le modèle hydrologique.

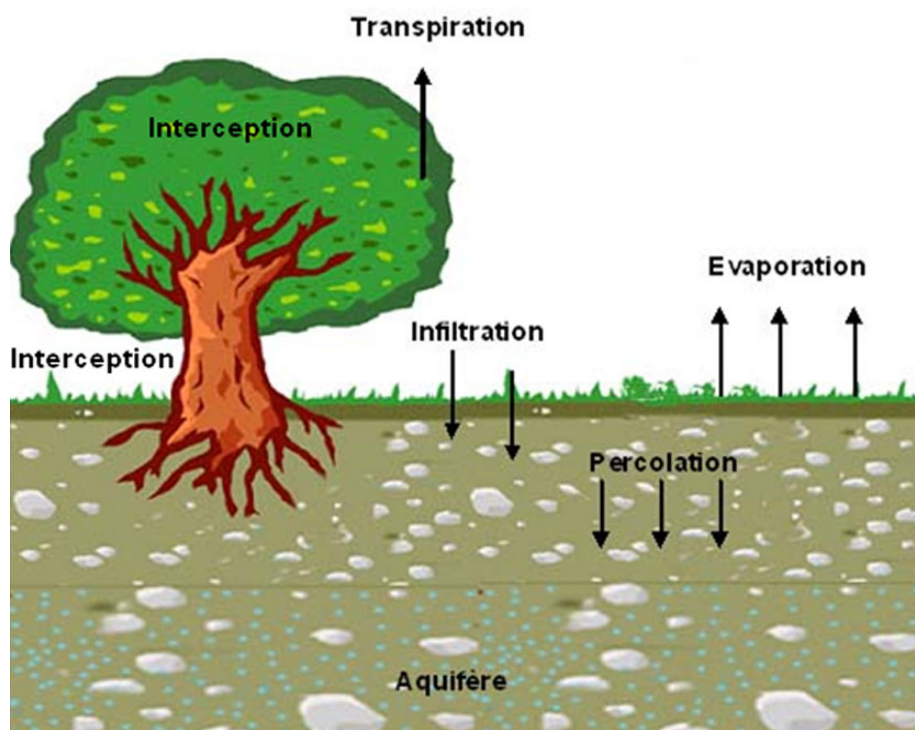


FIGURE II-4: schématisation des flux verticaux pris en compte par le modèle hydrologique

#### II-2.4.1.1 Interception

L'interception est le processus par lequel une partie de la précipitation est captée et retenue par la végétation puis évaporée sans avoir atteint la surface du sol (UNESCO, 1992). Le phénomène d'interception est modélisé suivant le schéma conceptuel d'un réservoir, dont la capacité dépend du type de couverture et qui se vide et se remplit en fonction des précipitations et de l'évaporation potentielle.

#### **II-2.4.1.2 Infiltration**

L'infiltration est le mouvement de l'eau pénétrant dans un milieu poreux depuis la surface du sol et s'écoulant dans le sol sous l'action de la gravité et des effets de pression. Les facteurs principaux qui affectent le processus d'infiltration sont la couverture végétale, la porosité, la conductivité hydraulique et le contenu en humidité du sol.

La conductivité hydraulique à saturation  $K_{sat}$  représente la valeur limite du taux d'infiltration pour un sol saturé et homogène. Rappelons que, en milieu saturé homogène, l'écoulement se fait par gravité vers le bas.

SWAT propose deux méthodes de calcul de l'infiltration: une méthode directe dans le cas où les précipitations à l'échelle infra-journalière sont disponibles et une méthode indirecte si seulement les cumuls journaliers sont disponibles.

La méthode directe applique l'équation de Green et Ampt basée sur la loi de Darcy et la conservation de la masse (Green et Ampt, 1911). L'infiltration s'effectue en deux phases: une première phase durant laquelle il n'y a pas encore présence de flaques et où l'infiltration est égale au taux de précipitation, suivie d'une seconde phase où, sous « l'effet piston » de la flaque formée en surface, l'infiltration s'effectue à un taux fonction de la conductivité hydraulique effective (fonction de la conductivité à saturation), de la succion au front d'humectation, de la porosité du sol et de la quantité déjà infiltrée. La méthode indirecte par contre consiste à calculer sur base journalière la lame infiltrée dans le profil comme la différence entre la lame d'eau précipitée et le ruissellement de surface calculé par la méthode du Curve Number (USDA Soil Conservation Service, 1972).

#### **II-2.4.1.3 Percolation**

La percolation représente l'infiltration profonde dans le sol en direction de la nappe phréatique. SWAT considère chaque couche de sol comme un réservoir caractérisé par sa profondeur, sa conductivité hydraulique à saturation  $K_{sat}$ , sa réserve utile (humidité à la capacité au champ  $SW_{cc}$  à laquelle est retranchée l'humidité au point de flétrissement permanent  $SW_{pfp}$ ), sa densité apparente et teneur en argile, ces deux dernières régissant l'humidité au point de flétrissement permanent. S'il y a plusieurs horizons (couches) au sein du profil de sol, SWAT considère un empilement de réservoirs, dont les caractéristiques diffèrent. La percolation est alors considérée comme le remplissage et la vidange d'une succession de réservoirs correspondant à chaque couche de sol et dont les capacités de stockage varient. Il y a percolation lorsque, au sein d'une couche donnée, le contenu en eau SW dépasse l'humidité à la capacité au champ ( $SW_{cc}$ ) et la couche inférieure n'est pas saturée. SWAT suppose que le mouvement est vertical en milieu non saturé.

Le flux de percolation est donné par l'équation:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right]$$

avec:

- $w_{perc,ly}$ : flux de percolation dans la couche inférieure l sur un jour donné y (mm H<sub>2</sub>O)
- $SW_{ly,excess}$ : contenu en eau en excès dans la couche l en un jour donné y (mm H<sub>2</sub>O)<sup>1</sup>
- $\Delta t$ : pas de temps (heure)
- $TT_{perc}$ : temps de percolation à travers la couche de sol (heure)

#### **II-2.4.1.4 Evapotranspiration**

<sup>1</sup> Le contenu en eau en excès dans la couche considérée  $SW_{ly,excess}$  est égal à la différence entre le contenu en eau du sol de la couche (SW) et le contenu en eau du sol à la capacité au champ pour la même couche ( $SW_{cc}$ )

L'évapotranspiration est un processus complexe composé d'une évaporation physique (l'ensemble des phénomènes de vaporisation directe de l'eau libre ou du sol nu sans passage par le matériel végétal) et d'une évaporation physiologique (transpiration ou évaporation de l'eau qui traverse le système vasculaire). La transpiration et l'évaporation participent à l'extraction de l'eau hors de la zone non saturée.

Au vu de la difficulté de distinguer entre les processus de transpiration et d'évaporation dans la situation d'un sol couvert par de la végétation et du fait qu'ils se produisent simultanément, ces deux phénomènes sont généralement regroupés sous le terme générique d'évapotranspiration.

Trois notions sont distinguées dans le processus d'évapotranspiration:

- Evapotranspiration potentielle ou de référence  $ET_0$ , définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal. Comme celle-ci est fonction de la demande climatique évaporatoire et des caractéristiques de la surface évaporante (albédo, etc.), il est nécessaire de définir une évaporation potentielle de référence (gazon).
- Evapotranspiration maximale d'une culture donnée  $ETM$ , définie à différents stades du développement végétatif, couvrant totalement ou non le sol, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales (sol fertile, bon état sanitaire, etc.).
- Evapotranspiration réelle  $ETR$  (ou évapotranspiration actuelle) définie comme la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel. Elle est réduite par rapport à  $ETM$  par un processus de fermeture stomatique régi par le déficit en eau.

L'évapotranspiration est calculée suivant des formalismes de complexité variée: Penman-Monteith (Penman, 1948), Kimberly-Penman (Wright, 1982), Priestley-Taylor (Priestley et Taylor, 1972), Turc (Turc, 1961), Hargreaves (Hargreaves, 1975), Blaney-Criddle (Blaney et Criddle, 1950), etc. Le modèle SWAT offre le choix entre trois options pour l'estimation de l' $ET_0$ , soit sur base du bilan d'énergie au niveau d'une surface évaporante (base physique) avec Penman-Monteith, soit par l'usage de relations empiriques faisant état de paramètres climatiques avec Priestley-Taylor ou, enfin, par la méthode d'Hargreaves. Ces méthodes varient en fonction des données exigées pour le calcul de l'évapotranspiration.

La méthode de Penman-Monteith requiert des données journalières de la radiation solaire, de la température de l'air, de la vitesse du vent (à 2 m de hauteur) et de l'humidité relative de l'air, ainsi que des paramètres dépendant de la couverture végétale (albédo, feuilles, teneur en eau du sol). Hargreaves et Priestley-Taylor ne nécessitent que des données journalières de la radiation solaire, de l'humidité relative et de la température de l'air. Du fait que les stations météorologiques répertoriées dans le bassin versant n'ont pas de données sur la vitesse du vent, précisons dès à présent que l'étude utilisera la méthode de Priestley-Taylor.

Dans le cas de l'équation de Priestley-Taylor, la quantité maximale transpirée par la plante est fonction de l'indice de surface foliaire selon l'équation:

$$E_t = \frac{E_0' \cdot LAI}{3,0} \text{ si } 0 \leq LAI \leq 3,0$$

$$E_t = E_0' \text{ si } LAI > 3,0$$

avec:

$E_t$ : quantité maximum transpirée par la plante par jour dans les conditions idéales (mm  $H_2O$ )

$E_0'$ : évapotranspiration potentielle ajustée en fonction de l'interception du couvert végétal

LAI : indice de surface foliaire pour un jour donné

Comme les conditions idéales sont rarement remplies, la quantité d'eau réellement transpirée par le couvert végétal est supposée égale à la quantité d'eau prélevée par les racines. Le calcul de cette demande qui décroît avec la profondeur est similaire au calcul de l'évapotranspiration du sol où le prélèvement en eau est fonction de la demande qui s'exerce sur le couvert végétal.

#### **II-2.4.1.5 Mouvement de l'eau vers les couches supérieures non saturées**

Lorsque la teneur en eau des couches supérieures du sol recouvrant l'aquifère diminue et s'approche du point de flétrissement, l'eau se diffuse vers le haut dans la frange capillaire qui sépare les zones saturées et non saturées. Dans la terminologie SWAT, le mouvement de l'eau à partir de l'aquifère superficiel vers les couches supérieures non saturées s'appelle REVAP.

Ce flux d'eau vers les couches sus-jacentes est modélisé par SWAT comme étant une fonction de la demande d'évapotranspiration et d'un facteur de remontée, selon l'équation suivante:

$$W_{revap} = \beta_{revap} \cdot ET_o$$

avec:

$W_{revap}$ : quantité d'eau quittant la nappe superficielle en réponse au déficit de la zone sus-jacente (mm H<sub>2</sub>O)  
 $\beta_{revap}$ : coefficient de remontée  
 $ET_o$ : évapotranspiration potentielle journalière (mm H<sub>2</sub>O)

Ce processus de remontée capillaire ne s'accomplit que si la quantité d'eau stockée dans l'aquifère superficiel et mesurée en mm dépasse la valeur d'un seuil (REVAPMN) spécifié par l'utilisateur.

#### **II-2.4.1.6 Recharge de l'aquifère**

SWAT simule deux types d'aquifères: l'aquifère superficiel non confiné (et donc susceptible de contribuer au débit de la rivière) et l'aquifère profond confiné où l'eau qui y pénètre est considérée comme perdue pour le bassin versant.

La recharge de l'aquifère superficiel est fonction entre autres des caractéristiques géologiques rencontrées et des écoulements à la base du profil de sol. Une fraction de la recharge de l'aquifère superficiel peut être soit acheminée vers l'aquifère profond, soit quitter l'aquifère superficiel vers les couches supérieures non saturées et via pompage racinaire directement dans l'aquifère.

$$w_{rchrgi} = [1 - \exp(-1/\delta_{gw})]w_{seep} + \exp(-1/\delta_{gw})w_{rchrg,i-1}$$

avec:

$w_{rchgi}$ : recharge de l'aquifère superficiel le jour i (mm)  
 $\delta_{gw}$ : temps de drainage des formations géologiques sus-jacentes (jour)  
 $w_{seep}$ : quantité totale d'eau quittant le bas du profil de sol le jour i (percolation ou écoulements préférentiels) (mm H<sub>2</sub>O)  
 $w_{rchg,i-1}$ : recharge de la veille (mm)

La percolation vers l'aquifère profond ne se déclenche que si la quantité d'eau stockée dans l'aquifère superficiel excède un seuil fixé par l'utilisateur.

#### **II-2.4.2 FLUX LATÉRAUX**

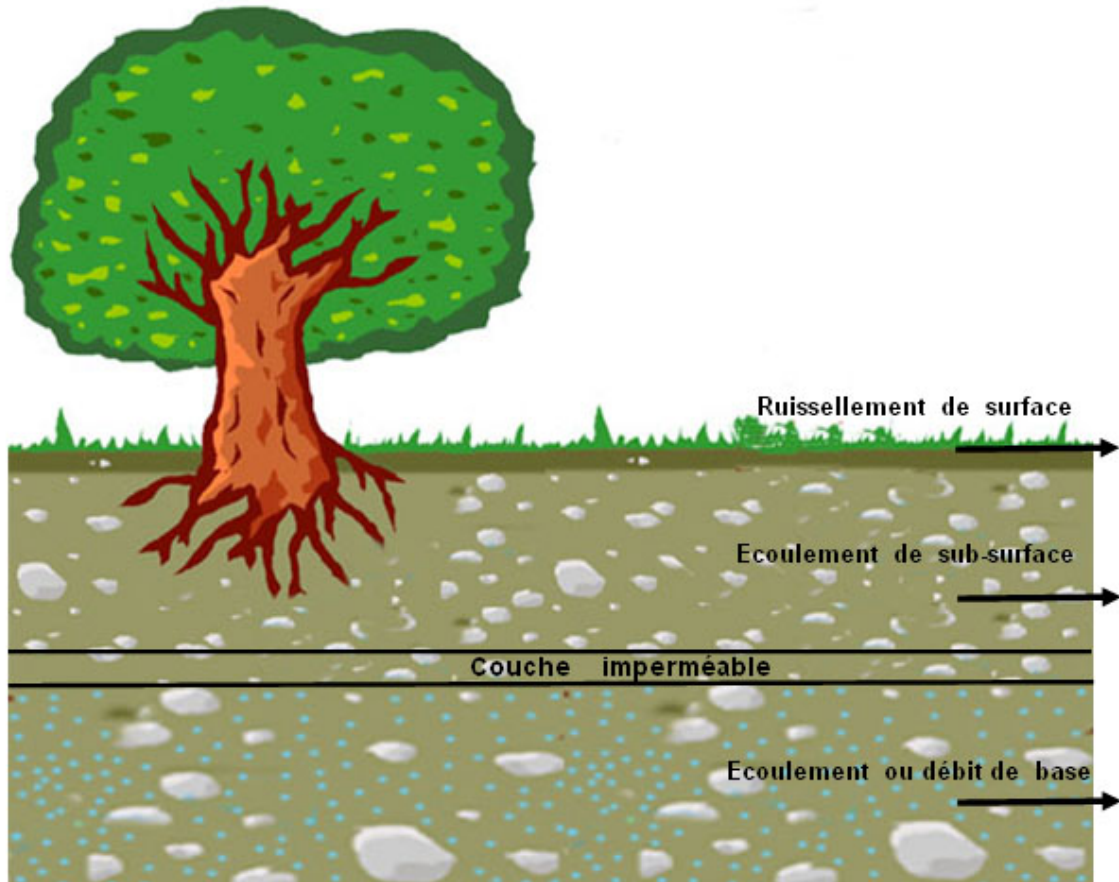
Dans la dimension latérale, le modèle hydrologique SWAT considère les flux d'eau suivants:

- Ruissellement de surface SURF\_Q (*saturation overland flow*): constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface du sol.
- Ecoulement de sub-surface LAT\_Q (ruissellement retardé, sub-surface, *interflow, lateral flow*): portion de la précipitation infiltrée qui n'est pas descendue jusqu'à la nappe libre, mais qui passe de la surface du sol vers les cours d'eau en cheminant sous la surface du sol<sup>1</sup>.
- Ecoulement de base GW\_Q (*base flow, return flow, flujo de retorno*): partie du débit d'un cours d'eau qui provient essentiellement des nappes souterraines superficielles durant des

<sup>1</sup> Une partie des précipitations infiltrées peut être contrainte de s'écouler quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre à la rencontre d'un chenal d'écoulement. Cette eau contribuant au gonflement de la crue est désignée dans la littérature sous le terme d'écoulement hypodermique rapide

périodes suffisamment longues où il ne se produit pas de précipitations. C'est lui qui fournit notamment le débit d'étiage des cours d'eau.

La figure II-5 illustre les différents flux latéraux pris en compte par le modèle hydrologique SWAT.



**FIGURE II-5: schématisation des flux latéraux pris en compte par le modèle hydrologique**

#### **II-2.4.2.1 Ruissellement de surface**

Le ruissellement sur la surface du sol se produit quand l'intensité de la pluie (exprimée généralement en mm/h) excède la capacité d'infiltration du sol. Son importance dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer la couche superficielle du sol avant que les processus d'infiltration et de percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérants. Aucun ruissellement ne s'opère tant que l'interception initiale par le couvert végétal (canopée) n'est pas atteinte. On peut distinguer deux stades dans l'écoulement de surface, qui peuvent se combiner:

- Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol non saturé (écoulement hortonien)
- Ecoulement par dépassement du seuil de saturation du sol (*saturation overland flow*) (Black et Dunne, 1970)

Comme les pluies ne sont disponibles que sous forme de cumuls journaliers, le calcul du ruissellement se basera sur la méthode indirecte SCS (1972) en fonction du groupe hydrologique des sols, de l'occupation des terres et des conditions antérieures d'humidité du sol.

La méthode SCS-CN modifiée considère que le ruissellement par dépassement de la capacité maximale d'infiltration ou ruissellement hortonien est le mécanisme dominant de production de l'écoulement. Cette capacité, caractérisée par l'infiltrabilité du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à une valeur constante qui est la conductivité hydraulique à saturation  $K_{sat}$ . Le volume ruisselé est estimé à partir de la détermination d'un paramètre global numérique de ruissellement  $CN^1$

<sup>1</sup> Curve number

qui est fonction des caractéristiques du bassin versant telles que le type de sol, la végétation, l'occupation des terres, la topographie et les techniques d'aménagement.

La méthode SCS répartit les sols en quatre groupes hydrologiques (A, B, C, D) en fonction de la capacité d'infiltration sur sol nu correspondant à une pluie de longue durée (capacité limite d'infiltration dans un sol proche de la saturation). Le tableau II-1 donne la description des groupes hydrologiques considérés par la méthode.

**TABLEAU II-1: définition des groupes hydrologiques des sols (source: Soil Conservation Service)**

Groupe hydrologique	Description
A	Sols à grande capacité d'infiltration (faible potentiel de ruissellement). Sols ayant une vitesse d'infiltration minimum comprise entre 7,5 mm/h et 12 mm/h et à drainage excellent à bon. Il s'agit de sables ou de sols profonds constitués soit de sable avec relativement peu de limon et d'argile, soit de loess à drainage excellent.
B	Sols à capacité d'infiltration, après humectation, supérieure à la moyenne (potentiel de ruissellement relativement faible). Sols à vitesse d'infiltration comprise entre 3 mm/h et 7,5 mm/h, bien à moyennement drainé. Il s'agit de sols sablo-limoneux, moins profonds que ceux du groupe A ou de loess moins profonds (50 à 125 cm), de texture moyennement grossière à moyennement fine (et donc moins structuré que le groupe A).
C	Sols à capacité d'infiltration, après saturation, inférieure à la moyenne (potentiel de ruissellement assez élevé). Sols à vitesse d'infiltration de base relativement faible (1 à 4 mm/h) et drainage modéré. Il s'agit de sols sablo-limoneux superficiels (15 à 75 cm) ainsi que des limons argileux à faible teneur en matière organique et à haute teneur en argiles et colloïdes à un degré moindre que ceux du groupe D, et de texture moyennement fine à fine. Ils contiennent souvent une couche imperméable à faible profondeur.
D	Sols à capacité minimale d'infiltration (potentiel de ruissellement très élevé). Sols à vitesse d'infiltration de base très faible (moins de 1 mm/h). Sols à teneur élevée en argiles gonflantes ou sols superficiels (moins de 75 cm) reposant sur une couche imperméable enfouie à faible profondeur (nappes permanentes à faible profondeur).

La relation entre la hauteur journalière d'eau précipitée et la lame d'eau ruisselée s'exprime par la relation suivante:

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

avec:

R: hauteur ruisselée (mm H<sub>2</sub>O)

P: précipitation journalière (mm H<sub>2</sub>O)

I<sub>a</sub>: hauteur d'eau initiale ne participant pas à l'écoulement (mm H<sub>2</sub>O)

S: paramètre de rétention

Lorsque la pluie commence à tomber, il n'y a pas de ruissellement immédiat. Cette rétention ou interception initiale I<sub>a</sub> correspond à la partie de la précipitation n'atteignant jamais le sol, au stockage de surface et à l'infiltration avant ruissellement; elle est estimée à 20% de la valeur du paramètre de rétention pour un jour donné. La hauteur d'eau initiale ne participant pas à l'écoulement est alors:

$$I_a = 0,2S$$

La relation devient alors:

$$R = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \text{ si } P > 0,2S$$

avec:

- R: hauteur ruisselée (mm H<sub>2</sub>O)
- P: précipitation journalière (mm H<sub>2</sub>O)
- I<sub>a</sub>: hauteur d'eau initiale ne participant pas à l'écoulement (mm H<sub>2</sub>O)
- S: paramètre de rétention

Remarquons que si  $P \leq 0,2S$ , il n'y a pas de ruissellement. Le paramètre de rétention S est déterminé par la relation de transformation suivante, à partir du paramètre CN physiquement basé qui représente le complexe hydrologique sol-couverture végétale et humidité antérieure du sol de la zone considérée:

$$R = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right)$$

La constante 254 de l'équation permet de transformer le résultat en mm. Le ruissellement démarre une fois que P est supérieur à I<sub>a</sub>.

Le paramètre CN est déterminé pratiquement à partir de la connaissance de trois types d'informations: les sols répartis en quatre groupes hydrologiques (infiltrabilité du sol), la couverture végétale et la quantité d'humidité des sols définie par les conditions antécédentes d'humidité dues aux pluies antérieures (de 0 pour les sols totalement secs à 100 pour les sols totalement saturés). La valeur du paramètre CN est obtenue à partir de tables avec une pente de terrain moyenne de 5% (Williams, 1995). Pour tenir compte d'une pente supérieure à 5 %, le Département d'Agriculture des États-Unis a développé la formule suivante:

$$CN_{2s} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2) \cdot [1 - 2\exp(-13,86s)] + CN_2$$

avec:

- CN<sub>2s</sub>: *curve number* en condition d'humidité II ajustée à la pente du terrain
- s: pente moyenne du sous-bassin en %

et:

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0,00673(100 - CN_2)]$$

Les valeurs du CN en fonction de l'occupation des terres et du mode d'aménagement sont données dans le tableau II-2 (Chow, 1964).

TABLEAU II-2: valeurs du paramètre de ruissellement CN (pente de 5 %; condition d'humidité II) (source: Chow, 1964) – Bassin de la Tolomosa

Occupation des terres	Mode d'aménagement	Comportement hydrologique	Groupe hydrologique (SCS)			
			A	B	C	D
Jachères, sol nu	Ordinaire	Défavorable	77	86	91	94
	Ordinaire	Défavorable	72	81	88	91
Plantes sarclées		Favorable	67	78	85	89
	En courbe de niveau	Défavorable	70	79	84	88
		Favorable	65	75	82	86
	En courbe avec terrasses	Défavorable	66	74	80	82
Céréales		Favorable	62	71	78	81
	Ordinaire	Défavorable	65	76	84	88
		Favorable	63	75	83	87
	En courbe de niveau	Défavorable	63	74	82	85
Légumineuses ou prairies temporaires		Favorable	61	73	81	84
	En courbe avec terrasses	Défavorable	61	72	79	82
		Favorable	59	70	78	81
	Ordinaire	Défavorable	66	77	85	89
Pâtures ou terres de parcours		Favorable	58	72	81	85
	En courbe de niveau	Défavorable	64	75	83	85
		Favorable	55	69	78	83
	En courbe avec terrasses	Défavorable	63	73	80	83
Boqueteaux		Favorable	51	67	76	80
	En courbe de niveau	Défavorable	47	67	81	88
		Moyen	25	59	75	83
	Route en terre	Défavorable	45	66	77	83
Route à revêtement en dur		Favorable	36	60	73	79
	Urbain		72	82	87	89
Superficie imperméable			74	84	90	92
			98	98	98	98
			100	100	100	100

#### II-2.4.2.2 Ecoulement de sub-surface

L'eau percole jusqu'à la base du profil (assimilée à une couche imperméable ou semi-imperméable) où, en s'accumulant, forme une zone saturée (nappe perchée). Le flux latéral est l'écoulement horizontal qui se produit dans les couches plus au moins superficielles du sol, au-dessus de l'aquifère perché. Il se réalise d'une part au travers des macropores interconnectés du sol ou au travers des microspores constituant la matrice d'un sol. Ces écoulements latéraux sont significatifs dans le cas des sols à haute conductivité hydraulique et avec un horizon imperméable à une petite profondeur.

Pour le calcul de l'écoulement latéral, SWAT se base sur l'équation de conservation de la masse en utilisant l'hypothèse de l'approximation de l'onde qui considère les lignes de flux comme parallèles à la couche imperméable et un gradient hydraulique égal à la pente. L'écoulement latéral est modélisé comme une fonction de la pente et la longueur du sous-bassin, de l'humidité, la porosité et la conductivité du sol, ainsi que le montre l'équation suivante:

$$Q_{lat} = 0,024 \frac{2 \cdot SW_{exc} \cdot K_{sat} \cdot pente}{\Phi_d \cdot L_{hill}}$$

avec:

$Q_{lat}$ : écoulement latéral (mm H<sub>2</sub>O/jour)  
 $SW_{exc}$ : volume drainable d'eau de la couche saturée (mm H<sub>2</sub>O)  
 $K_{sat}$ : conductivité hydraulique du sol à saturation (mm/h)  
 $\Phi_d$ : porosité du sol (mm/mm)  
 $L_{hill}$ : longueur du sous-bassin

Remarquons que l'eau en excès de la capacité au champ peut percoler ou s'écouler latéralement. Aussi, les équations de percolation et d'écoulement de sub-surface sont résolues simultanément dans le profil entre 0-2 m pour éviter qu'un des processus ne domine l'autre.

#### II-2.4.2.3 Ecoulement de base

L'aquifère superficiel ne contribue au débit du cours d'eau que si la quantité d'eau stockée mesurée en mm (hauteur d'eau) dépasse une valeur seuil spécifiée par l'utilisateur du modèle. Pour modéliser le flux de base à partir de la nappe souterraine, SWAT utilise l'équation suivante:

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}} \cdot h_{wtbl}$$

avec:

$Q_{gw}$ : écoulement de base issu de l'aquifère (mm H<sub>2</sub>O)  
 $K_{sat}$ : conductivité hydraulique de l'aquifère (mm/jour)  
 $L_{gw}$ : distance de l'aquifère au chenal (m)  
 $h_{wtbl}$ : hauteur de la nappe (m)

La hauteur de la nappe au jour  $i$  est donnée par la formule suivante:

$$h_{wtbli} = h_{wtbli,i-1} \cdot \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t) + \frac{w_{rchr} \cdot [1 - \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t)]}{800 \cdot \mu \cdot \alpha_{gw}}$$

avec:

$h_{wtbli}$ : hauteur de la nappe au jour  $i$   
 $h_{wtbli,i-1}$ : hauteur de la nappe au jour  $i - 1$  (m)  
 $\alpha_{gw}$ : constante de récession du débit  
 $\Delta t$ : pas de temps (jour)  
 $w_{rchr}$ : recharge journalière de l'aquifère au jour  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)  
 $\mu$ : rendement spécifique de l'aquifère (m/m)

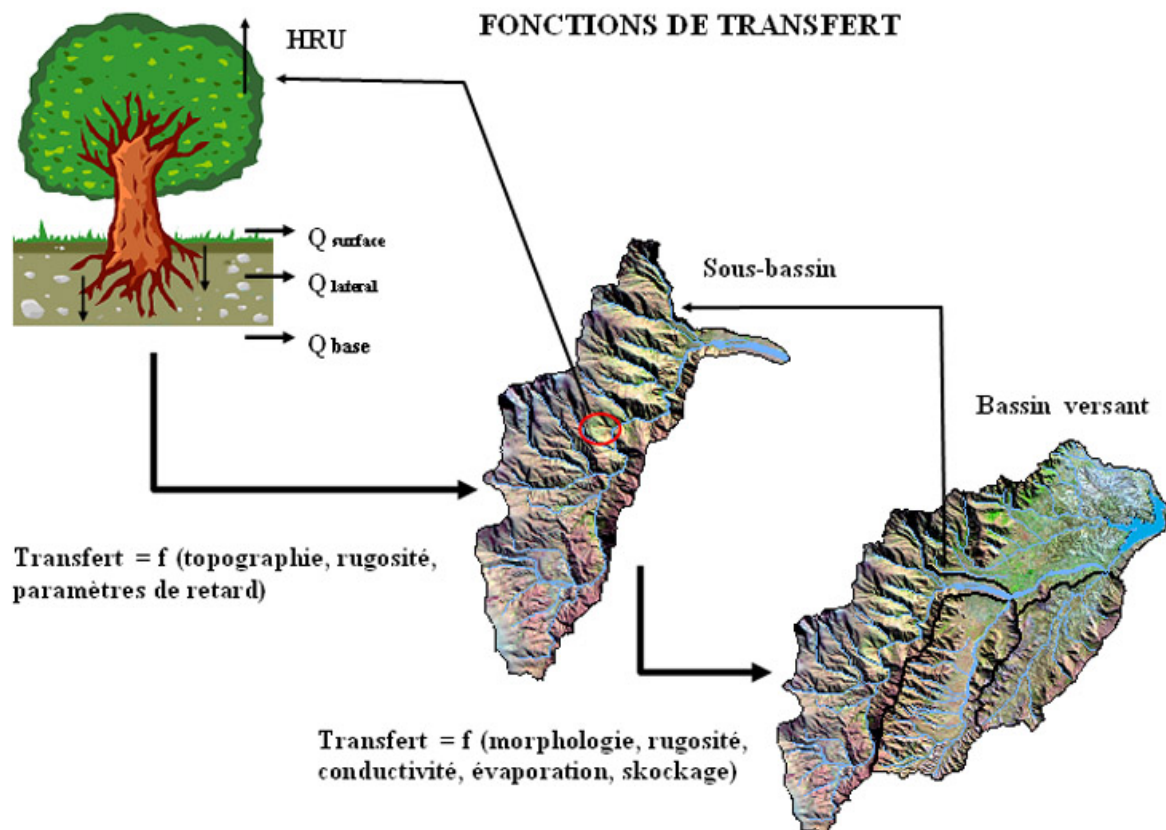
## II-2.5 FONCTION DE TRANSFERT DES FLUX D'EAU

L'unité de base pour laquelle tous les flux sont calculés est l'HRU. Les HRU situées dans un même sous-bassin versant alimentent la rivière via les différents flux latéraux qui y sont générés. Les différents sous-bassins sont eux-mêmes reliés par le réseau hydrographique.

Les processus dominants des flux d'eau diffèrent selon l'échelle spatio-temporelle envisagée. L'établissement du bilan en eau à l'échelle du profil des sols est sensible à une résolution correcte des processus rapides. L'échelle temporelle est de l'ordre de l'heure et l'échelle spatiale autour du mètre. Par contre, à l'échelle du bassin versant, les processus s'agrègent, se compensent et interagissent; certains peuvent être négligés alors que d'autres deviennent prépondérants et les plus sensibles sont les processus globaux. Le temps de transfert d'une lame d'eau entre l'amont du bassin et son exutoire joue un rôle important dans l'établissement du bilan en eau au détriment des écoulements préférentiels au sein du sol.

Les solutions généralement présentées dans la littérature proposent soit d'identifier un jeu de paramètres équivalents, soit d'utiliser des méthodes d'agrégation pour passer du local à l'unité hydrologique, soit d'établir des lois de changement d'échelles. Cependant, ces approches d'identification des paramètres et de spatialisation sont entachées d'incertitudes et on a plutôt recours au calage «raisonné» de quelques paramètres représentatifs d'une échelle donnée et porteurs d'un sens physique. Dans cette thèse, la valeur donnée au paramètre représente la valeur moyenne pour le sous-bassin et/ou l'HRU considérée.

Le schéma de la figure II-6 précise les principaux paramètres pris en compte par les fonctions de transfert ainsi que les échelles considérées (adapté de Chaponnière, 2005).



**FIGURE II-6: schématisation des principaux paramètres pris en compte par les fonctions de transfert et échelles spatiales considérées (source: adapté de Chaponnière, 2005)**

On constate que différentes échelles spatiales interviennent en passant de l'unité élémentaire de calcul à l'unité d'un sous-bassin et enfin au bassin versant tout entier.

### II-2.5.1 CHEMINEMENT DE L'EAU DANS LE SOUS-BASSIN

### II-2.5.1.1 Transfert du ruissellement de surface

La contribution du ruissellement de surface est transférée de l'HRU vers la rivière du sous-bassin en tenant compte du temps de concentration du sous-bassin qui, à partir d'un point quelconque du bassin, correspond pour une goutte d'eau à la somme du temps nécessaire pour atteindre le cours d'eau<sup>1</sup> et, finalement, l'exutoire du sous-bassin<sup>2</sup>. Un ajustement de ce temps de transfert est possible grâce à un paramètre de retard.

### II-2.5.1.2 Transfert de l'écoulement de sub-surface

Pour la contribution de l'écoulement de sub-surface au débit du cours d'eau, SWAT utilise l'équation suivante:

$$Q_{lat} = (Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1}) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-1}{TT_{lat}}\right) \right]$$

avec:

$Q_{lat}$ : écoulement de sub-surface dans le cours d'eau (mm H<sub>2</sub>O)

$Q'_{lat}$ : écoulement de sub-surface généré dans le sous-bassin (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{latstor,i-1}$ : flux latéral stocké le jour précédent (mm H<sub>2</sub>O)

$TT_{lat}$ : temps de retard du ruissellement (jour)

Le deuxième terme de la formule est le paramètre de retard introduit par SWAT pour tenir compte du phénomène de stockage temporaire.

Soulignons qu'il n'y a pas de fonction de transfert pour le débit issu des nappes profondes.

### II-2.5.2 CHEMINEMENT DE L'EAU DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

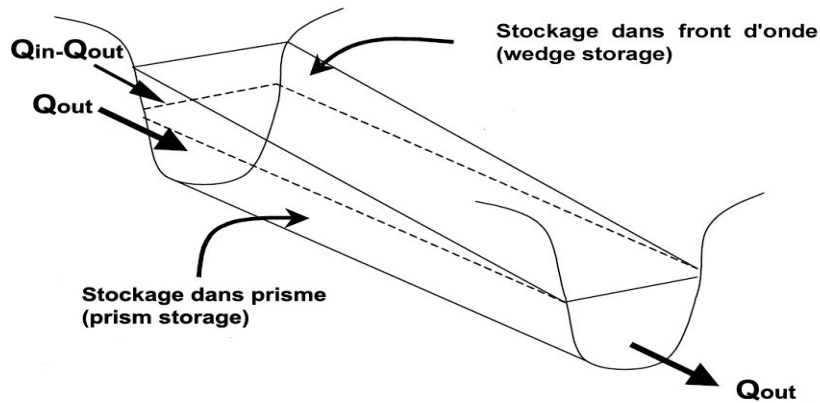
Une fois le ruissellement de surface ainsi que les écoulements de sub-surface transférés de l'unité de production au cours d'eau, le modèle peut simuler explicitement le transfert de la lame d'eau au sein même du réseau hydrographique. SWAT utilise l'équation de Manning pour calculer la vitesse (m/s) et le débit (m<sup>3</sup>/s) d'un flux uniforme en fonction des caractéristiques du cours d'eau telles que la géométrie, la topographie et le coefficient de rugosité. La lame d'eau atteignant le cours d'eau est déterminée à chaque pas de temps.

L'écoulement à surface libre dans les rivières (routage) est régi par un système d'équations différentielles non linéaires, comprenant une équation de conservation et une équation dynamique. Pour simuler le débit en tout point du réseau hydrographique, SWAT propose deux méthodes dérivées de la théorie de l'onde cinématique: la méthode de stockage variable développée par Williams (1969) et la méthode de Muskingum développée par McCarthy (1938) qui est la fonction de routage la plus populaire. Ces méthodes approximatives calculent l'amortissement d'une onde de crue en se basant sur la résolution, pour un tronçon du cours d'eau, de l'équation de continuité avec l'hypothèse de la dépendance linéaire du volume d'eau comme débit pondéré entrant et sortant du tronçon.

Ces méthodes diffèrent par la conceptualisation du volume de stockage dans le cours d'eau: la méthode du stockage variable considère un stockage en prisme, la méthode de Muskingum y ajoutant un terme de stockage en front d'onde. Lorsqu'une onde de crue atteint un tronçon du cours d'eau, le flux entrant excède le flux sortant et la quantité d'eau augmente dans le tronçon (stockage positif en front d'onde). Une fois que l'onde passe, le flux sortant excède le flux entrant et la quantité d'eau diminue dans le tronçon (stockage négatif en front d'onde). En plus du stockage en front d'onde, la section considérée contient le stockage en prisme qui correspond à un volume de section constante sur la longueur du tronçon. Une section de cours d'eau est schématisée de la figure II-7 suivant que la méthode Muskingum ou la méthode de stockage variable est utilisée pour la simulation de l'écoulement au sein du réseau hydrographique.

<sup>1</sup> Temps fonction de la pente moyenne du sous-bassin, du coefficient de rugosité de Manning (surface du sol) et de la longueur de pente

<sup>2</sup> Temps fonction de la longueur et de la pente de la rivière, du coefficient de rugosité de Manning et de la superficie du bassin



**FIGURE II-7: schématisation d'une section de cours d'eau avec la méthode Muskingum et la méthode de stockage variable (Chow et al., 1988)**

En plus, le modèle soumet la lame d'eau au processus d'évaporation et à des pertes par transfert qui représentent le volume d'eau qui s'infiltre dans le lit et les berges du cours d'eau en réduisant l'écoulement dans la rivière de l'amont vers l'aval. Ces pertes sont plus au moins importantes selon la nature et la géométrie du lit de la rivière et contribuent soit à l'alimentation de l'aquifère, soit à l'alimentation des zones non saturées adjacentes. Les pertes par évaporation le long du réseau hydrographique sont fonction de la demande évaporatoire, de la longueur et de la largeur du cours d'eau.

## II-2.6 CROISSANCE DU COUVERT VEGETAL

Un module de croissance de la végétation est intégré dans le modèle. Le taux de croissance du couvert végétal est directement lié à l'augmentation de la température, partant de l'hypothèse que, pour chaque type de plantes considéré par le modèle, il existe une température de base sous laquelle il n'y a pas de croissance végétale et un nombre d'unités de chaleur requis pour atteindre la maturité.

L'interception de l'énergie nécessaire à la croissance est estimée par une fonction du rayonnement solaire et de l'indice de surface de la feuille (LAI<sup>1</sup>) du couvert considéré. Le LAI est simulé par des équations dépendantes des unités de chaleur. SWAT considère que le taux de photosynthèse de la canopée est une fonction linéaire de l'énergie interceptée. Le modèle tient compte de la hauteur et la fermeture de la canopée ainsi que le développement racinaire.

La croissance potentielle journalière en biomasse est estimée par SWAT comme le produit entre l'énergie solaire interceptée et le facteur de couvert RUE<sup>2</sup> qui permet la conversion de l'énergie en biomasse (quantité de biomasse sèche produite par unité de radiation solaire interceptée en kg/ha (MJ/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>). Le RUE est sensible au déficit de vapeur d'eau. La croissance réelle diffère de la croissance potentielle en fonction des températures extrêmes et du stress hydrique. Le stress hydrique est simulé en comparant la transpiration potentielle et réelle du couvert. Le stress de température est fonction de la température moyenne journalière de l'air et de la température optimale de croissance du couvert.

## II-2.7 GENERATEUR CLIMATIQUE

SWAT peut générer des données météorologiques journalières manquantes dans une série à partir de données moyennes mensuelles générées sur base de statistiques à long terme ou de données historiques de la station la plus proche fournies par l'utilisateur (WXGEN). Le générateur climatique WXGEN génère d'abord la précipitation journalière, ensuite la température maximum et minimum, enfin la radiation solaire et l'humidité relative. Ces données ne sont générées qu'à la demande de l'utilisateur.

## II-2.8 RENDEMENT EN SEDIMENT

### II-2.8.1 PROCESSUS EROSIF

<sup>1</sup> Leave area index

<sup>2</sup> Radiation-use efficiency

L'érosion résulte de nombreux processus qui se jouent au niveau de trois phases: le détachement des particules, le transport solide et la sédimentation. Quelle que soit l'échelle de l'étude, on retrouve partout ces trois phases de l'érosion, mais avec des intensités différentes.

## II-2.8.2 MODELISATION DE LA PRODUCTION DE SEDIMENTS

La modélisation du rendement en sédiment d'une parcelle ou d'un bassin versant se fait par l'intermédiaire d'une variante de l'équation de Wischmeier connue également sous le nom d'équation universelle modifiée de perte en sol (MUSLE) qui remplace le facteur d'énergie de la pluie de l'équation universelle de perte en sol USLE par un facteur de ruissellement représentant l'énergie utilisée pour l'arrachage et le transport de la particule. Ce facteur est fonction de l'humidité antérieure ainsi que de l'énergie de la pluie. A la différence de la USLE qui s'applique pour des données moyennes annuelles de 20 ans, la MUSLE est un modèle événementiel permettant d'évaluer les pertes provoquées par un événement pluvieux important (échelle de l'averse). Ce modèle peut alors être appliqué pour l'ensemble des crues se produisant pendant une période, et ce, de manière individuelle. L'utilisation de ce modèle exige donc des informations sur les crues journalières. L'équation de la perte en sol est la suivante:

$$Y = 11,8.(Q_{\text{surf}} \times q_p \times S_{\text{HRU}})^{0,56} . R . K . LS . C . P$$

avec:

Y: rendement en sédiment ou perte en sol par unité de surface et par événement (tonne/ha)

$Q_{\text{surf}}$ : volume du ruissellement correspondant à l'averse ( $\text{m}^3$ )

$S_{\text{HRU}}$ : superficie d'HRU (ha)

$q_p$ : débit de ruissellement de pointe ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Les autres facteurs sont ceux de USLE (Wischmeier, 1978)

R: indice d'érosivité de la pluie

K: indice d'érodibilité caractéristique du sol

LS: indice topographique combinant l'effet de la longueur L de la parcelle et de la plus grande pente S de la parcelle

C: indice de couverture végétale (interpolation linéaire entre les valeurs correspondant aux deux stades végétatifs encadrant la date de la pluie)

P: indice des pratiques antiérosives

L'indice d'érosivité de la pluie R vise à quantifier l'effet combiné de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement. Il est égal à l'énergie cinétique des pluies que multiplie l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure. Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9% de pente. L'érosivité de la pluie est définie par:

$$R = E . I_{30}$$

avec:

E: énergie cinétique de la pluie considérée

$I_{30}$ : intensité maximale observée de la pluie pendant une durée de 30 minutes (cm/heure)

L'énergie cinétique de la pluie est donnée par la formule:

$$E = 210 + 89.\log_{10}I$$

où I est l'intensité de la pluie

Le facteur d'érodibilité du sol K est défini comme la sensibilité du sol superficiel à l'érosion, c'est-à-dire à se désagréger et à être transporté. Il est fonction de la matière organique et de la texture du sol, de la perméabilité et de la structure du profil. Il varie de 0,7 pour les sols les plus fragiles à 0,01 pour les sols les plus stables. Les valeurs de K peuvent être déterminées en utilisant un nomogramme général fournissant la valeur de K en fonction de la structure et la texture du sol, de la teneur en matière organique et de sa perméabilité.

Le facteur topographique LS caractérisant l'effet du relief est défini comme la distance horizontale depuis l'origine du ruissellement jusqu'au point où le gradient de pente diminue suffisamment pour

qu'un dépôt se fasse ou que le ruissellement se concentre dans une rigole. Cet indice topographique combine l'effet de la longueur L de pente d'une parcelle ou d'un versant et l'inclinaison (S) de cette pente. La formule suivante donne le facteur topographique LS en fonction de la pente et de la longueur de la pente.

$$LS = (L/22,15)^m \times (65,41\sin^2S + 4,56 \sin S + 0,065)$$

avec:

LS: indice topographique  
S: degré de la pente de la parcelle (pourcentage)  
L: longueur de la parcelle (m)  
m = 0,5 pour S > 5 % ;  
m = 0,4 pour 3,5 < S < 4,5 % ;  
m = 0,3 pour 1 < S < 3 % ;  
m = 0,2 pour S < 1 %.

Le type de couvert végétal est à prendre en compte puisque, de lui, vont dépendre l'amortissement des gouttes de pluie et le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. L'indice (sans dimension) de couverture C est un rapport entre l'érosion sur sol nu et l'érosion observée sous un système de production. On inclut dans le même facteur C à la fois le couvert végétal, son niveau de production et les techniques culturales qui y sont associées. Ce facteur peut varier de 1 sur sol nu à 1/1000ème sous forêt, 1/100ème sous prairies et plantes de couverture et de 1 à 1/10ème sous cultures sarclées.

Le facteur P de pratiques antiérosives est défini comme le rapport entre la perte en sol d'une parcelle où est appliquée une mesure antiérosive et la perte en sol d'une parcelle identique sans cette mesure. Si l'on considère que seulement un petit nombre d'aménagements sont réalisés en matière de protection des sols contre l'érosion, le facteur de pratiques antiérosives peut être considéré comme égal à l'unité.

SWAT calcule la production de sédiments due à la pluie et au ruissellement séparément pour chaque HRU puis en fait la somme pour avoir la production par sous-bassin. Cependant, les variations locales du relief ne sont pas toujours prises en compte, alors qu'elles peuvent être à l'origine d'érosion concentrée dans les régions de faibles pentes. Cette précision n'est plus nécessaire pour les pentes moyennes fortes, le relief local n'ayant qu'un effet secondaire par rapport à la pente moyenne.

Lors du calcul du rendement en sédiment, l'étude considère les chenaux comme passifs, c'est-à-dire qu'il n'y a ni dépôt ni érosion. De cette manière, les résultats de la modélisation ne reflètent que les rendements en sédiment de la surface du sol. Soulignons aussi que le modèle ne permet pas d'estimer les pertes en sol par ravinement, alors qu'on connaît l'importance de ce phénomène dans les sous-bassins TolomosaA et Mena (confer carte de la figure I-10 et tableau I-11).

## **II-3 SIMULATION DU BILAN EN EAU**

### **II-3.1 REVISION BIBLIOGRAPHIQUE**

L'application du modèle SWAT couvre un large domaine, passant de l'influence du changement climatique sur les ressources en eau à celle des engrais sur la qualité de l'eau (confer le site SWAT mis à jour régulièrement; SWAT deuxième conférence internationale, 2005; SWAT quatrième conférence internationale, 2007).

Dans la littérature, un grand nombre d'études et d'articles sont plus particulièrement dédiés à la modélisation du bilan en eau d'un bassin versant avec le modèle SWAT (confer point II-2.2). Parmi la centaine d'études répertoriées par Gassman (2007), celles qui ont apporté des informations utiles sont reprises dans la bibliographie de l'étude. Ainsi que le constate White (2005), très peu parmi toutes ces études offrent une information détaillée sur l'analyse de sensibilité, le calibrage des variables et la validation du modèle.

### **II-3.2 DISCRETISATION SPATIALE ET TEMPORELLE**

La structure du modèle spatialisé est basée sur une segmentation de l'espace en unités hydrologiques<sup>1</sup> basée sur l'identification de zones représentatives caractérisées par un fonctionnement hydrologique particulier. Cette approche implique l'identification de la résultante des processus hydrologiques sur chacune de ces zones. La segmentation en unités hydrologiques irrégulières (par opposition à un découpage géométrique en mailles régulières) permet de tenir compte des discontinuités hydrologiques et s'adapte mieux aux hétérogénéités du milieu.

Le modèle a été appliqué avec un pas de temps journalier sur une échéance temporelle de huit ans, de 1976 à 1984 divisée en une période de calibrage (1976 à 1981) et de validation ou contrôle (1981 à 1984). L'année considérée est l'année hydrologique qui couvre la période annuelle des mois d'août à juillet. Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques aux paramètres choisis du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée. L'étape de validation ou de contrôle consiste à vérifier la reproductibilité des résultats du modèle sur une autre période de temps. Le tableau II-3 donne la discrétisation temporelle des périodes de simulation du bilan en eau du bassin de la Tolomosa.

**TABLEAU II-3: discrétisation temporelle des périodes de simulation – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	Années hydrologiques							
	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84
Etape	Mise en régime des débits	Calibrage du 01/08/77 au 31/07/81				Validation du 01/08/81 au 31/07/84		

On considère la période d'août 1976 à juillet 1977 comme l'année de mise à jour des états initiaux du modèle qui n'est pas prise en compte lors du calcul des statistiques d'erreur. Le modèle définit les conditions hydrologiques antérieures nécessaires à la première année de la modélisation et qui influencent de nombreux paramètres tels que l'évapotranspiration, la percolation et le CN.

### II-3.3 ANALYSE DE SENSIBILITE

Le modèle SWAT utilise une grande quantité de paramètres supposés indépendants pour la modélisation du bilan en eau d'un bassin versant, dont beaucoup sont difficiles à mesurer directement. De plus, ce grand nombre de variables est nettement supérieur à la quantité des données disponibles pour son calage et est très coûteux en temps de calcul.

Comme tous les paramètres n'ont pas le même poids sur les sorties du modèle, l'analyse de sensibilité préalable à l'étape de calibrage a pour but d'identifier les paramètres sensibles, dont la valeur a une forte influence sur la variable de sortie et sur lesquels une plus grande attention doit être portée lors du calibrage. Le choix des paramètres sensibles est basé sur la littérature pertinente et les recommandations du manuel SWAT (Neitsch et al., 2002). Cette sélection permet alors de travailler, lors de la phase de calibrage, avec un nombre plus réduit de paramètres parmi l'énorme quantité présente dans le modèle.

Cette analyse de sensibilité couvre la période de 1977 à 1981 et consiste à faire varier, dans une fourchette prédéterminée, la valeur d'un seul paramètre à la fois, en considérant les autres comme fixes pour ne pas créer d'interactions entre eux-ci. La valeur optimum du paramètre est celle qui minimise l'écart entre les valeurs des données observées et estimées des débits. Avant de commencer l'analyse de sensibilité, les paramètres, dont la valeur est déterminée sur base d'identifications indépendantes (base de données préparée antérieurement, suggestions du manuel SWAT, littérature scientifique, etc.) ont été fixés et comprennent principalement ceux liés aux caractéristiques du sol, de l'occupation des terres et de la topographie du sous-bassin.

### II-3.4 CALIBRAGE ET VALIDATION

#### II-3.4.1 PHASE DE CALIBRAGE

Une fois les paramètres sensibles sélectionnés, le calibrage manuel, qui est une étape importante de la modélisation, vise en définitive à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs des débits observés ( $Q_{obs}$ ) et celles des débits simulés ( $Q_{sim}$ ) en faisant varier un des nombreux

<sup>1</sup> Appelées HRU (*Hydrologic Response Unit*)

paramètres du modèle. Durant la phase de calibrage, les séries historiques de débits observés à la station de San Jacinto sont comparées avec celles simulées par le modèle sur base annuelle, mensuelle et journalière.

La paramétrisation implique des problèmes liés aux effets d'échelle, c'est-à-dire le passage de la mesure expérimentale à l'échelle ponctuelle à la valeur à affecter au paramètre à l'échelle de l'unité hydrologique ou du bassin versant (confer point II-2.5).

Le calage du modèle hydrologique reste aussi difficile à cause de la dépendance et la corrélation des paramètres entre eux. Comme pour tous les modèles distribués, il existe plus d'une combinaison de valeurs des paramètres qui peuvent donner le même résultat, c'est-à-dire engendrer un problème d'équifinalité (Beven, 2001). Il faut alors admettre que l'on ne peut pas représenter le comportement hydrologique d'un bassin versant par un jeu de paramètres uniques c'est-à-dire qu'il n'y a en règle générale pas un seul et unique jeu optimal de paramètres pour caler un modèle. Aussi, les différentes étapes du calibrage ont suivi les recommandations et la logique suivantes, proposées dans le manuel SWAT (Neitsch, 2002):

1. Ruissellement superficiel et écoulement de sub-surface
2. Ecoulement de base
3. Rendement en sédiment<sup>1</sup>

Les paramètres du ruissellement superficiel sont calibrés en premier lieu, suivis de ceux de l'écoulement de sub-surface et, enfin, de l'écoulement de base. Les paramètres liés aux rendements en sédiment sont calibrés en dernier lieu. Pour chaque processus précité, les paramètres ont été répartis en trois groupes. Le premier groupe contient les variables, dont la valeur fournie par défaut par le modèle est modifiée sur base d'identifications indépendantes (base de données préparée antérieurement, suggestions du manuel SWAT, littérature scientifique, etc.).

Les valeurs des variables du second groupe sont obtenues par le calibrage sur la période de quatre années hydrologiques, à partir du mois août 1977 jusqu'à juillet 1981, en procédant de façon itérative pour obtenir des résultats de simulation les plus semblables aux données d'observation de référence, c'est-à-dire atteindre la meilleure performance du modèle à confirmer par les critères statistiques appropriés. Ce calibrage s'effectue dans une fourchette restreinte de valeurs basées physiquement pour éviter un calibrage aveugle, dont le résultat s'éloignerait dans une large mesure de la réalité biophysique et de la base de données établie pour le bassin versant.

Enfin, les paramètres du troisième groupe sont ceux pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou dont les effets sont peu compris. Ils sont estimés en prenant les valeurs par défaut suggérées par le modèle.

#### **II-3.4.2 PHASE DE VALIDATION**

A l'issue de la phase de calibrage, il est nécessaire de vérifier la reproductibilité des résultats et la représentativité des paramètres calés. C'est l'opération de validation qui se fixe pour objectif de tester la robustesse du calage et de vérifier si les années de référence de la phase de calibrage ne sont pas singulières.

La validation considérée est de type mono-critère qui consiste à valider les résultats du calage par rapport à une variable (mesures de débit).

Les procédures de validation sont les mêmes que celles du calibrage où les valeurs simulées et observées sont simplement comparées et ne sont plus ajustées. Cependant, la validation couvre une période différente de celle du calibrage (*split sample test*).

#### **II-3.5 EVALUATION DES PERFORMANCES DU MODELE**

Juger la performance d'un modèle reste un processus subjectif qui dépend des paramètres choisis. Pour arriver à un jugement objectif de la performance du modèle et en décider l'acceptation des résultats, on compare les simulations des débits avec les séries historiques disponibles en fonction de divers critères en termes de qualité (ajustement du modèle à la réalité), de robustesse (conservation

---

<sup>1</sup> Quantité de sédiments transportée hors de l'unité géographique étudiée

des performances du modèle de la phase de calibrage à la phase de contrôle) et de fiabilité (conservation des performances d'un modèle d'un bassin versant à un autre). Ce dernier critère n'est pas utilisé dans cette étude.

### II-3.5.1 CRITERES DE PERFORMANCE

La performance est évaluée sur base de la comparaison entre plusieurs critères statistiques pour une analyse de la dispersion des données simulées par rapport aux données observées et de la comparaison visuelle des hydrogrammes des écoulements totaux observés et simulés (comparaison des bilans).

Il existe dans la littérature de nombreux critères indépendants du jugement de l'observateur. Jusqu'à présent, aucun critère absolu permettant de juger les performances d'un modèle n'est établi dans la littérature scientifique. Le principe le plus classique est de comparer l'écart entre les débits simulés et observés par le biais de l'erreur quadratique moyenne, en rendant cette quantité adimensionnelle pour faciliter les comparaisons.

Dans le cas de l'évaluation de la performance du modèle SWAT, Gassman (2007) indique que les critères statistiques les plus largement utilisés sont le coefficient d'efficacité EF (Nash and Sutcliffe, 1970) et le coefficient de détermination  $R^2$ . Une des raisons est la facilité de comparer la valeur de l'indice avec la valeur de référence 1 (Coffey et al., 2004). Le jugement qualitatif de la performance du modèle SWAT est rendu dans cette thèse en termes des coefficients suivants, dont les valeurs minima, maxima et optima sont reprises dans le tableau II-4:

**TABLEAU II-4: critères statistiques utilisés pour l'analyse des résultats des modélisations – Bassin de la Tolomosa**

Critère statistique	Min.	Max.	Optimum
EF (coefficient d'efficacité Nash et Sutcliffe, 1970)	$-\infty$	1	1
$R^2$ (coefficient de détermination)	0	1	1
Ecart-type	0	+	0

Le coefficient d'efficacité EF représente la partie de la variance expliquée par le modèle, le résidu étant la différence entre la valeur observée et la valeur simulée. Il se présente sous la forme suivante:

$$EF = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{isim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{moyenobs})^2} = 1,0 - \frac{MSE}{\sigma_0^2} = 1,0 - \frac{(RMSE)^2}{\sigma_0^2}$$

avec:

i: observation du jour i

$Q_{iobs}$ : valeur journalière observée i (cm)

$Q_{isim}$ : valeur journalière simulée i (cm)

$Q_{moyenobs}$ : moyenne des valeurs journalières observées entre 1 et n (cm)

MSE: erreur quadratique moyenne (*mean square error*)

RMSE: racine de l'erreur quadratique moyenne (*root mean squared error*)

$\sigma_0^2$ : variance de la donnée observée (*variance of the observed data*)

La formule montre qu'EF est le rapport entre l'erreur quadratique moyenne (MSE) et la variance de la donnée observée soustrait de l'unité. Il existe donc une relation proportionnelle directe entre l'indice EF et l'erreur quadratique moyenne (MSE) ou sa racine (RMSE). L'intervalle de cet indice varie entre moins l'infini et 1. Le modèle est parfaitement validé lorsque le critère de Nash ou EF est égal à 1 (ou 100%) quand MSE = 0,0, c'est-à-dire dans les conditions parfaites. Soulignons aussi que les valeurs d'EF peuvent être négatives, car le critère est calculé en tenant compte des valeurs vraies des différences et non des valeurs absolues. L'asymétrie de la distribution du critère de Nash-Sutcliffe peut poser certains problèmes: si la performance d'un modèle est très mauvaise, il y a des valeurs négatives très grandes en valeur absolue qui constituent un obstacle au calcul d'une moyenne. Dans

le cadre de cette thèse, l'indice est calculé avec l'aide de la feuille de calcul CALIBRA (Biesbrouck, 2003).

Le coefficient de détermination  $R^2$  correspond par définition au carré du coefficient de corrélation qui concerne l'intensité ou la netteté de la relation qui existe entre deux séries d'observations (Dagnelie, 2007). Ce coefficient a pour équation:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{moyenobs}) \cdot (Q_{isim} - Q_{moyensim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{moyenobs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{isim} - Q_{moyensim})^2}} \right]^2$$

avec:

i: observation du jour i

n: nombre total d'observations

$Q_{iobs}$ : valeur journalière observée i (cm)

$Q_{isim}$ : valeur journalière simulée i (cm)

$Q_{moyen obs}$ : moyenne des valeurs journalières observées entre 1 et n (cm)

$Q_{moyen sim}$ : moyenne des valeurs journalières simulées entre 1 et n (cm)

Ce coefficient représente le rapport entre la covariance des deux séries d'observations par le produit de leurs écarts-types. Cet indice permet d'examiner un aspect de la performance du modèle, à savoir la similarité de la tendance entre les valeurs des débits observés et simulés. En effet, des valeurs élevées de  $R^2$  peuvent être obtenues même si les valeurs des séries simulées diffèrent significativement des séries observées puisque l'indice est insensible à des différences proportionnelles entre les séries observées et simulées. Cependant, le  $R^2$  est moins performant pour les valeurs extrêmes des débits, c'est-à-dire durant les périodes de crue et d'étiage où les débits observés et simulés sont les plus éloignés du débit moyen. L'indice est calculé avec l'aide de la feuille de calcul CALIBRA (Biesbrouck, 2003).

Pour caractériser la performance du modèle, nous considérons aussi l'écart-type résiduel observé (déviation standard;  $RMSE^1$ ), quantité réelle positive éventuellement infinie qui mesure en  $m^3/s$  la dispersion d'une série de valeurs (résidus) autour de leur moyenne. L'écart-type est la racine carrée de la variance résiduelle et se présente sous la forme suivante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{isim})^2}{n}}$$

avec:

i: = observation du jour i

n: nombre total d'observations

$Q_{iobs}$ : valeur journalière observée i ( $m^3/s$ )

$Q_{isim}$ : valeur journalière simulée i ( $m^3/s$ )

Enfin, si la corrélation concerne la netteté ou l'intensité de la relation qui existe entre deux séries d'observations, la notion de droite de régression est liée à l'allure, supposée linéaire, de cette relation. Aussi, les résultats des modélisations sont également présentés sous forme d'une droite de régression déterminée par la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire de manière à rendre minimum la somme des carrés des écarts entre les points observés et les points correspondants sur la droite. La droite de régression de y (variable dépendante) en x (variable indépendante) pour équation (Dagnelie, 2007):

$$y = \left[ \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x^2} \right] (x - \bar{x}) + \bar{y}$$

<sup>1</sup> Root mean square error

avec:

x: valeur observée

$\sigma_x^2$ : variance (valeur observée)

$\left[ \frac{\text{COV}(x, y)}{\sigma_x^2} \right]$ : coefficient de régression

### II-3.5.2 BILANS MENSUELS, ANNUELS ET INTERANNUELS

La comparaison des bilans en eau ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observations. Aussi, les bilans mensuels et annuels simulés correspondent à une somme annuelle jour à jour aux dates correspondantes, uniquement lorsqu'une donnée observée correspond à une donnée simulée. En conséquence, il existe dans cette étude une différence entre la somme des débits annuels simulés (*Water Yield*<sup>1</sup>) qui correspond à la somme des valeurs simulées pour chaque jour de l'année et la somme annuelle des débits épurés qui représente la somme des valeurs simulées où chaque donnée simulée correspond à une donnée observée.

La comparaison et l'analyse des hydrogrammes portent tout d'abord sur les sommes annuelles et mensuelles des écoulements totaux observés et simulés par SWAT, montrées aux dates correspondantes par année hydrologique sur les phases de calibrage et validation. Rappelons que l'année 76-77, dite de mise en régime, n'est pas reprise ici dans les bilans.

Enfin, les évolutions des débits observés disponibles ( $Q_{\text{obs}}$ ) et des débits simulés<sup>2</sup> par le modèle sont comparées en regard des valeurs des précipitations aux dates correspondantes.

### II-3.6 RENDEMENT EN SEDIMENT

Rappelons que les rendements en sédiment sont calculés par SWAT avec l'équation universelle de perte en sol modifiée MUSLE (Williams, 1995). Selon Molina (1992), le modèle MUSLE est celui qui s'applique le mieux pour la Bolivie.

Les rendements simulés en sédiment sont comparés avec les résultats obtenus lors des campagnes bathymétriques effectuées dans le réservoir de San Jacinto en avril 1989 et en 1995 par le Service hydrographique naval bolivien et en août 2004 par l'entreprise Caryglobal srl.

## II-4 BASES DE DONNEES COMPLEMENTAIRES

La qualité et la quantité des données disponibles jouent un rôle crucial dans le succès de n'importe quel modèle hydrologique.

La qualité de l'information récoltée ou disponible (information secondaire) se mesure, entre autres, par la précision de l'information spatiale (échelle des cartes, dimension des pixels), la densité des réseaux d'observations (précipitations, données climatiques, débits) et la longueur des séries historiques d'observations (climatologiques et hydrologiques).

Chaque unité hydrologique de calcul (HRU) exige un nombre considérable de données pour pouvoir décrire ses caractéristiques. Le problème majeur rencontré concerne la rareté des données géodistribuées existantes pour pouvoir rencontrer l'exactitude et la densité exigées par le modèle. Les données spatialement récoltées requises par SWAT sont réparties par l'utilisation conjointe du SIG de base en cinq couches d'information géoréférencée dans le système UTM qui sont les suivantes:

1. Registres journaliers des données débitométriques observées à l'exutoire
2. Registres journaliers des données météorologiques (précipitation, température de l'air, radiation solaire, humidité relative) et localisation des stations pluviométriques et météorologiques
3. Modèle numérique de terrain (MNT), qui est l'expression numérique des courbes de niveau du bassin
4. Carte numérique et description des unités de couvertures végétales/occupations des terres
5. Carte numérique et description des unités des sols

---

<sup>1</sup> WYLD

<sup>2</sup> Les données simulées proviennent du fichier WATOUT non épuré

## II-4.1 DONNEES DEBIMETRIQUES

### II-4.1.1 DISPONIBILITE SPATIALE

L'étude a utilisé les registres journaliers de débits enregistrés par ENDE (Entreprise nationale d'Electricité) à la station limnimétrique de San Jacinto A. Cette station se situe à 270 m en aval de l'axe actuel du barrage déversoir, à la sortie de la gorge de la Tolomosa et au confluent de la rivière Guadalquivir (confer carte de la figure I-3).

### II-4.1.2 DISPONIBILITE TEMPORELLE

L'étude a utilisé les registres journaliers disponibles de débits enregistrés par ENDE de 1976 à 1984 qui correspondent à la période de mesures antérieures à la construction du réservoir de San Jacinto (confer annexe II-1). Les observations débitométriques ont été prises trois fois par jour (8h, 12h, 16h), sous la responsabilité du personnel technique de SENAMHI. Les hauteurs d'eau mesurées sur l'échelle limnimétrique préalablement installée par ENDE ont été transformées en débits à l'aide d'une courbe de tarage établie par jaugeage au moulinet par SENAMHI. Chaque donnée observée des séries disponibles est la moyenne des trois mesures journalières de débit.

Le tableau II-5 indique la période de mesures débitométriques disponibles à l'exutoire du bassin versant de la Tolomosa.

**TABLEAU II-5: période de mesures disponibles de débit à l'exutoire - Bassin de la Tolomosa**

Station	Rivière	Variable mesurée	Période
San Jacinto A	Tolomosa	débit (m <sup>3</sup> /s)	1976 à 1984

Le tableau II-6 indique la disponibilité des données débitométriques journalières en nombre de jours et en pourcentage par mois et par année hydrologique à la station débitométrique de San Jacinto A du bassin de la Tolomosa.

### II-4.1.3 QUALITE DES DONNEES

Certaines erreurs peuvent affecter significativement le relevé limnimétrique des débits observés ( $Q_{obs}$ ), dues par exemple à la précision de la lecture de l'échelle limnimétrique (plus ou moins 1 cm de hauteur d'eau par exemple) faite par l'observateur ou au manque de maintenance de la section de mesure. Des erreurs dans l'établissement de la courbe de tarage peuvent provenir de la précision des jaugeages eux-mêmes (type de moulinet, nombre de points de mesure), du régime d'écoulement (relation plus ou moins univoque entre débit et hauteur d'eau dans la rivière en crue ou en décrue) et des modalités d'extrapolation dans la gamme des débits très faibles ou très élevés. De plus, vu l'ancienneté des mesures, aucun des observateurs n'a pu être contacté pour vérifier avec précision le moment exact de la journée où la lecture limnimétrique a été réellement effectuée.

La comparaison journalière par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes est donnée sur la période de 1976 à 1984 à l'annexe II-4. L'analyse visuelle montre très peu de données aberrantes (*outliers*)<sup>1</sup>.

## II-4.2 DONNEES METEOROLOGIQUES

### II-4.2.1 INTRODUCTION

Le bassin de la rivière Tolomosa, bien qu'ayant une superficie relativement réduite, possède une importante variation climatique, déterminée par les changements d'altitude qui varient entre 1.880 m approximativement à l'exutoire du bassin et 4.660 m (Negro de Chiquirio). Cette variation d'altitude a une influence déterminante sur la température et la distribution de la précipitation et, par conséquent, sur le climat local. Dans la partie sud-ouest de la cordillère de Sama, le paysage est très montagneux avec des altitudes élevées qui sont à l'origine d'une plus grande concentration d'humidité sous forme de brouillard, bruines et pluies orographiques. Le contraire se produit dans le nord-est avec un paysage de vallées, dont l'altitude diminue jusqu'à atteindre les 1.880 m. Cette dynamique topographique crée en plus une mosaïque de microclimats déterminés par le relief local et

<sup>1</sup> Celles-ci ont été mises en évidence par le tracé d'un cercle rouge

l'exposition: par exemple, les versants orientés au sud ou sud-est reçoivent une plus grande quantité de précipitations que ceux orientés au nord, nord-est (Alzérreca et al., 1998; PEA(a), 1998; PEA(b), 1998).

Les conditions climatiques ont un caractère saisonnier marqué par la période sèche d'avril à septembre (hiver) et la période humide d'octobre à mars (été). En général, l'été se caractérise par des vents dominants du sud et sud-est avec des masses d'air instables humides et chaudes qui produisent des précipitations isolées de haute intensité et de courte durée (orage), une température élevée et une humidité relative importante. Ces caractéristiques sont dues à la haute pression située dans l'océan

**TABLEAU II-6: données journalières observées (1976 – 1984) à la station débitométrique de San Jacinto A sur la période de 1976 à 1984 (source: ENDE et SENAMHI) - Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Nombre de données journalières disponibles et pourcentage par mois et année												
	Août (31)	Sept. (30)	Oct. (31)	Nov. (30)	Déc. (31)	Janv. (31)	Fév. (28)	Mars (31)	Avril (30)	Mai (31)	Juin (30)	Jul. (31)	Total (365)
1976 – 77	16	15	15	15	16	16	20	27	21	28	27	28	244
Mise en régime	52 %	50%	48%	50%	52%	52%	71%	87%	70%	90%	90%	90%	67%
1977 – 78	30	28	29	28	29	30	26	30	28	29	29	29	345
Calibrage	97%	93%	94%	93%	94%	97%	93%	97%	93%	94%	97%	94%	95%
1978 – 79	29	28	28	28	27	24	14	24	28	29	26	26	311
Calibrage	94%	93%	90%	93%	87%	77%	50%	77%	93%	94%	87%	84%	85%
1979 – 80	28	28	29	27	23	0	26	28	28	27	27	29	300
Calibrage	90%	93%	94%	90%	74%	0%	93%	90%	93%	87%	90%	94%	82%
1980 – 81	30	15	16	15	26	27	21	26	28	29	28	16	277
Calibrage	97%	50%	52%	50%	84%	87%	75%	84%	93%	94%	93%	52%	76%
1981 – 82	16	15	16	27	26	21	22	12	28	1,5	14	16	228
Validation	52%	50%	52%	90%	84%	68%	79%	39%	93%	48%	47%	52%	62%
1982 – 83	8	11	17	15	17	17	12	30	15	14	15	14	189
Validation	26%	50%	55%	50%	55%	55%	43%	97%	50%	45%	50%	45%	52%
1983 – 84	15	14	13	13	17	7	0	0	5	7	4	4	99
Validation	48%	47%	42%	43%	55%	23%	0%	0%	17%	23%	13%	13%	27%

Atlantique provoquant l'arrivée de masses d'air depuis le sud-est du continent et se heurtent en première instance aux montagnes subandines avec des hauteurs atteignant 1.600 jusqu'à 2.000 m. Ensuite, face à la cordillère de Sama, ces masses s'élèvent encore plus, se refroidissent et précipitent. Ce phénomène crée un gradient d'humidité très variable et plusieurs types climatiques dans le bassin. D'autre part, l'hiver se caractérise par des températures faibles et une humidité relative basse et l'absence de précipitations. L'hiver est aussi associé à l'arrivée de fronts froids provenant du sud (Patagonie) appelés *surazos*, qui entraînent des masses froides d'air, en donnant lieu parfois à des précipitations d'intensité très basse, mais de longue durée, avec des chutes abruptes de température d'un jour à l'autre. Le tableau II-7 donne la répartition des types climatiques trouvés dans le bassin (PEA(a), 1998).

**TABLEAU II-7: types climatiques - Bassin de la rivière Tolomosa (source: PEA(a), 1998)**

Type climatique	Superficie	
	(ha)	(% du BV)
Tempéré semi-aride	18.747	43
Froid semi-humide	14.007	32
Très froid semi-humide	2.311	5
Très froid humide	8.136	19

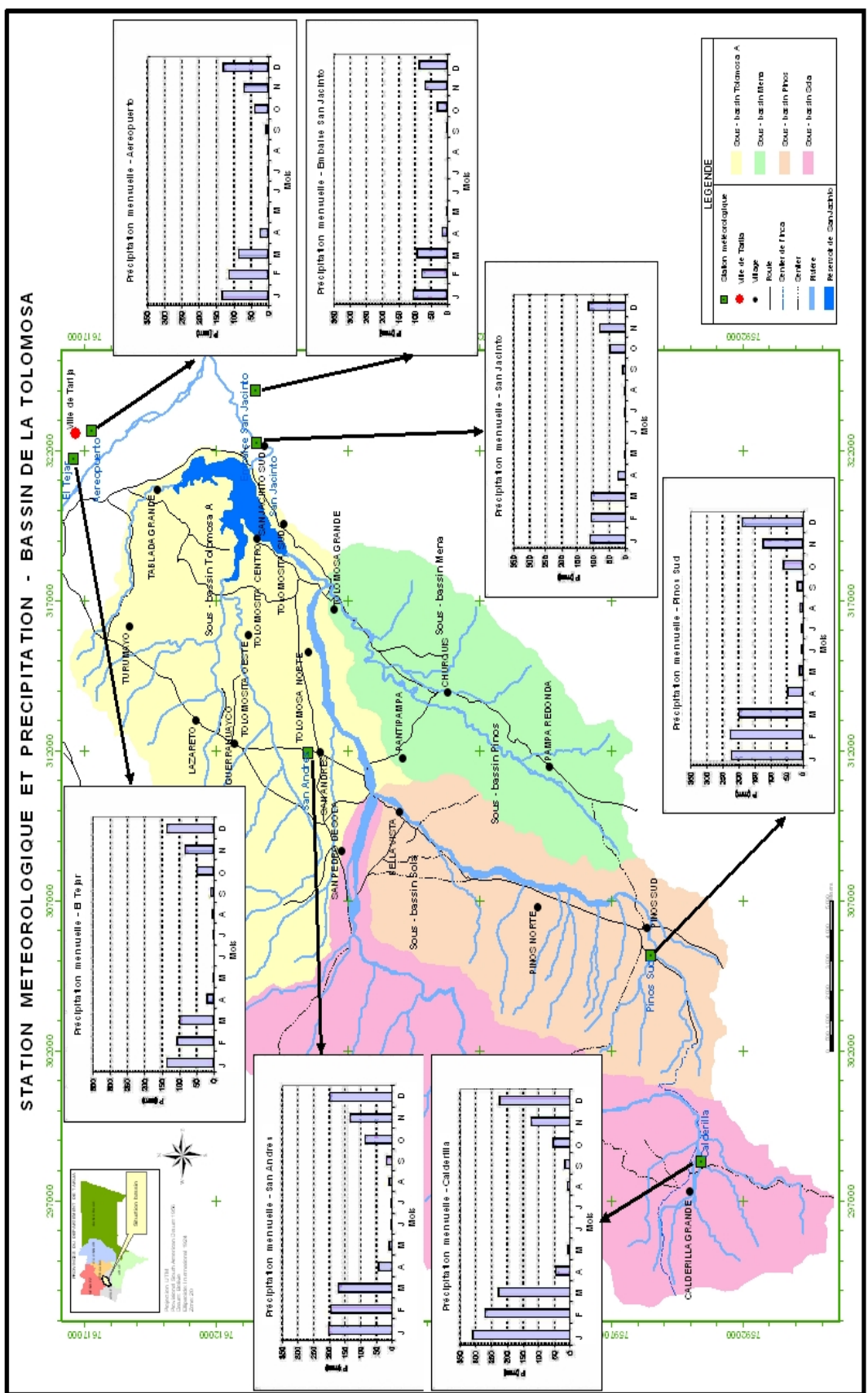
#### **II-4.2.1.1 Distribution spatiale**

Les stations météorologiques et pluviométriques, dont les données sont utilisées directement ou indirectement pour la modélisation du bassin versant, sont reprises dans le tableau II-8.

**TABLEAU II-8: stations pluviométriques et météorologiques (source: SENAMHI, 2002) - Bassin de la Tolomosa**

Station	Bassin versant	Latitude sud (degré)	Longitude ouest (degré)	Altitude (m)
<b>VALLEE</b>				
Aeropuerto	Guadalquivir	21° 32'	64° 43'	1.875
El Tejar U	Guadalquivir	21° 32'	64° 44'	1.859
Embalse	Tolomosa	21° 35'	64° 45'	1.800
San Jacinto	Tolomosa	21° 37'	64° 45'	1.850
<b>ALTITUDE</b>				
San Andres	Tolomosa	21° 37'	64° 49'	1.900
Pinos Sud	Tolomosa	21° 44'	64° 53'	2.100
Calderilla	Tolomosa	21° 45'	64° 57'	2.800

La carte de la figure II-8 localise les différentes stations pluviométriques et météorologiques disponibles pour l'étude hydrologique du bassin.



**FIGURE II-8: réseau de stations pluviométriques et météorologiques par sous-bassin et précipitations mensuelles moyennes sur la période de mesures disponibles (source: adapté de SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa**

### II-4.2.1.2 Disponibilité temporelle

Comme les précipitations sont les plus importantes entre les mois de novembre et mars, l'année hydrologique couvre la période d'août à juillet pour obtenir une meilleure représentation visuelle des graphiques. Le tableau II-9 présente, pour les stations pluviométriques et météorologiques retenues, les périodes disponibles des données nécessaires à l'étude hydrologique du bassin versant et mesurées journalièrement pour chaque station.

Comme la station Aeropuerto possède les séries de données les plus longues et les plus complètes, elle est considérée par SENAMHI comme la station régionale de référence.

**TABLEAU II-9: stations pluviométriques et météorologiques et périodes disponibles par observation (source: SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa**

Station	Temp. max. (°C)	Temp. min. (°C)	Précipitation (mm)	Humidité relative (%)	Radiation solaire (W/m <sup>2</sup> )
<b>VALLEE</b>					
Aeropuerto	1963–2004	1963-2004	1955-2004	1955-2004	----
El Tejar "U"	1970–2004	1970-2004	1970-2004	1975-2004	1977-2004
Embalse	1991-1999*	1991-1999*	1991-1999*	1991-1999*	----
<b>ALTITUDE</b>					
San Jacinto	1976–1996	1976-1996	1976-2004	1979-1996	----
San Andres	1995–2004	1995-2004	1975-2004	1996-2004	----
Pinos Sud	----	----	1972-2004	----	----
Calderilla	----	----	1975-2003	----	----

(\*) Année 1993 sans données

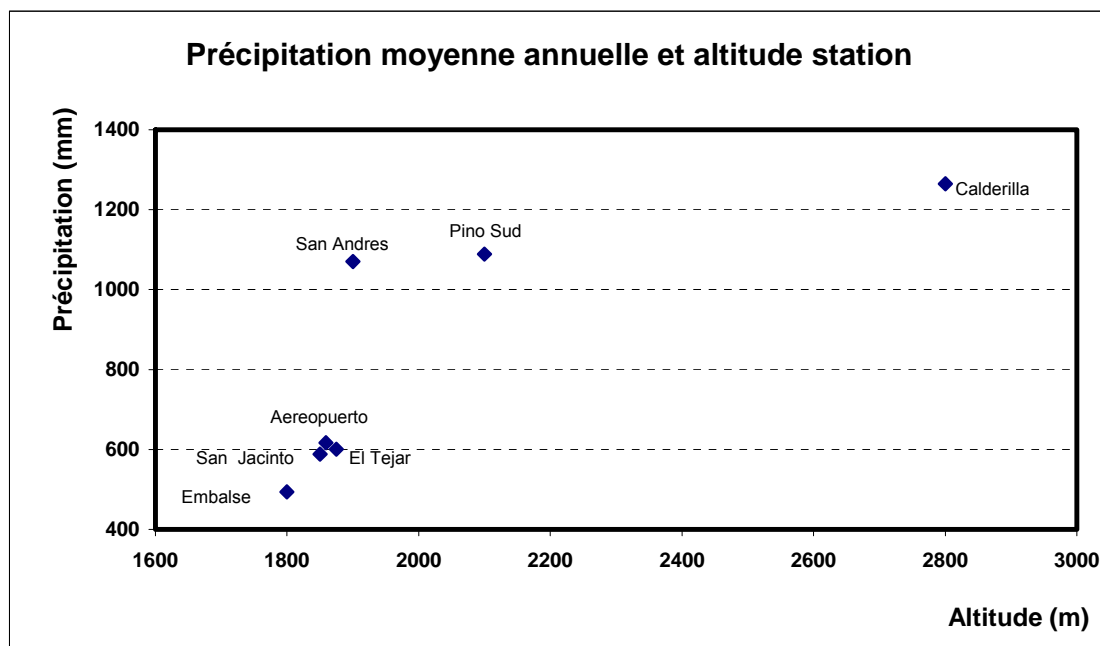
La précipitation mensuelle moyenne sur les périodes avec données observées de la station Aeropuerto (1955 à 2004) et des trois stations situées dans le bassin de la Tolomosa (Pinos, San Andres et Calderilla) est reprise dans le tableau II-10.

**TABLEAU II-10: précipitations mensuelles moyennes sur les périodes avec données des stations à l'intérieur du bassin (Pinos, San Andres et Calderilla) et de la station de référence (Aeropuerto) (source: adapté de SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa**

Mois	Aeropuerto		Pinos		San Andres		Calderilla	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Août	2,1	0,3	7,0	0,6	7,4	0,7	11,9	0,9
Septembre	6,8	1,1	18,6	1,7	16,3	1,5	19,1	1,5
Octobre	35,8	6,0	60,3	5,5	82,8	7,7	57,3	4,5
Novembre	69,1	11,5	123,2	11,3	130,0	12,1	110,6	8,7
Décembre	130,4	21,7	175,1	16,1	196,8	18,4	206,5	16,3
Janvier	134,7	22,4	231,8	21,3	206,5	19,3	307,7	24,3
Février	113,4	18,9	224,2	20,6	193,8	18,1	264,2	20,9
Mars	82,4	13,7	185,8	17,1	179,2	16,7	216,1	17,1
Avril	21,8	3,6	46,5	4,3	44,1	4,1	50,9	4,0
Mai	2,5	0,4	9,5	0,9	9,1	0,9	10,3	0,8
Juin	0,8	0,1	4,4	0,4	2,0	0,2	4,9	0,4
Juillet	0,7	0,1	2,1	0,2	2,5	0,2	5,0	0,4
<b>TOTAL</b>	<b>600</b>	<b>100</b>	<b>1.088</b>	<b>100</b>	<b>1.070</b>	<b>100</b>	<b>1.264</b>	<b>100</b>

On constate que la période pluvieuse s'étend des mois d'octobre à mars, avec plus de 90 % de la précipitation annuelle; décembre et janvier sont les mois les plus pluvieux avec des précipitations qui oscillent entre 16 et 24 % du total annuel.

Le graphique de la figure II-9 donne l'altitude des stations et la variation altimétrique de la précipitation annuelle moyenne sur la période de données disponibles.



**FIGURE II-9: altitude des stations pluviométriques et météorologiques et variation altimétrique de la précipitation annuelle moyenne sur la période de mesures disponibles – Bassin de la Tolomosa**

L'analyse du graphique des précipitations annuelles moyennes sur la période de mesures disponibles indique un net gradient pluviométrique en fonction de l'altitude: plus la station est à une altitude élevée, plus la précipitation annuelle moyenne est importante. Ce gradient serait dû, entre autres, à l'apport des pluies orographiques. En effet, à l'altitude de la station pluviométrique de Calderilla, le relief de la chaîne de montagnes Sama située à l'ouest du bassin versant force les masses d'air à s'élever. Ce genre de barrière naturelle provoque des pluies orographiques ou de la bruine souvent assimilée à la pluie horizontale<sup>1</sup> (Bruinzeel, 2001). Cependant, actuellement, il n'y a pas de mesures disponibles de la pluie horizontale.

#### II-4.2.2 ANALYSE PLUVIOMETRIQUE

Une bonne connaissance des données pluviométriques est essentielle pour l'analyse hydrologique du bassin versant.

Toute l'information requise par le modèle est préalablement analysée avant d'être introduite dans les fichiers d'entrée SWAT, conformément au format requis. Une attention toute particulière est apportée à l'analyse de la qualité de ces données d'un point de vue de la disponibilité temporelle et spatiale (données aberrantes ou manquantes).

Le modèle SWAT adopte une distribution uniforme de la précipitation (également pour la température) pour chaque sous-bassin, dont les données proviennent de la station la plus proche du centroïde du sous-bassin considéré. SWAT n'utilise pas de facteur de réduction pour tenir compte de la distribution inégale de la pluie sur un bassin.

##### II-4.2.2.1 Erreurs

La constitution d'une série de valeurs d'un échantillon au sens statistique du terme est un processus au cours duquel de nombreuses erreurs sont susceptibles d'être commises durant la transmission de l'information, son stockage ou son traitement.

La valeur vraie est la valeur idéale qu'on obtiendrait si toutes les causes d'erreur étaient éliminées. Elle demeure inconnue. On considère deux grands types d'erreur:

- Erreurs systématiques, totalement corrélées. On parle aussi d'inconsistance. En supposant qu'aucune erreur aléatoire n'affecte les mesures, la différence entre la vraie valeur et la valeur

<sup>1</sup> La pluie horizontale est formée par la condensation de l'eau des nuages qui précipite au sol

mesurée, si elle existe, est alors due à une erreur systématique. L'origine des erreurs systématiques est le plus souvent liée à la calibration imparfaite de l'appareil de mesure ou son déplacement, à un phénomène extérieur qui perturbe la mesure comme le changement d'observateur, un reboisement, à des effets de vent, etc.

- Erreurs aléatoires (ou accidentelles) qui affectent différemment chaque mesure individuelle (non corrélées). Ce sont les erreurs qui restent une fois les erreurs systématiques éliminées et tendent à se distribuer autour du zéro, c'est-à-dire avoir une somme algébrique nulle. Elles sont dues à des raisons nombreuses et variées, généralement inconnues. On trouve par exemple des lectures erronées ou des relevés effectués à des heures irrégulières.

#### ***II-4.2.2.2 Méthode de contrôle***

Les données météorologiques utilisées dans cette étude ont été vérifiées du point de vue de leur homogénéité et consistance, en utilisant des techniques de type statistique ou graphique, avant d'être introduites dans les tableaux correspondants de l'interface AvSWAT du modèle. Ce prétraitement des données a pour objectif de mettre en évidence d'éventuelles différences systématiques ou aléatoires entre hauteurs de précipitations annuelles obtenues entre les stations du bassin versant.

Une série non homogène de données journalières observées dans une station météorologique sur une longue période se traduit graphiquement par un changement brusque de la pente ou de la moyenne et variance en relation avec les valeurs des données originales.

La méthode utilisée est celle du double cumul, très employée en hydrologie, qui permet de déceler une éventuelle inhomogénéité. Elle implique une base de données chronologique de deux stations différentes pour une même variable climatique, dont une des stations est considérée comme ayant des données homogènes (station de référence). La proportionnalité des valeurs mesurées entre la station de référence et celle à contrôler est alors vérifiée. L'hypothèse de cette méthode statistique considère que les données des stations situées dans une même zone climatique ont des totaux annuels et mensuels proportionnels.

#### ***II-4.2.2.3 Analyse des données journalières***

Les séries historiques fournies par SENAMHI ont des données observées journalières de précipitation pour chaque jour de la période de modélisation 1976–1984 pour l'ensemble des stations situées dans le bassin et la station de référence. A partir de ces séries journalières, les séries mensuelles et annuelles des précipitations ont été établies dans des fichiers Excel. Le tableau II-11 présente les valeurs des précipitations mensuelles et mensuelles moyennes de la station de référence et des trois stations situées dans le bassin versant sur la période de 1976 à 1984.

**TABLEAU II-11: précipitations mensuelles et moyennes mensuelles sur la période de 1976 à 1984 (source: SENAMHI, 2002) - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Année	Aeropuerto (mm)	Pinos (mm)	San Andres (mm)	Calderilla (mm)
Janvier	1976	153,4	150,8	86,5	517,7
Janvier	1977	167,8	192,1	115,8	149,5
Janvier	1978	141,7	179,7	187,0	219,1
Janvier	1979	117,0	292,0	256,0	371,2
Janvier	1980	145,4	322,2	329,8	255,9
Janvier	1981	158,9	473,7	262,1	370,2
Janvier	1982	143,4	240,0	228,0	306,5
Janvier	1983	57,9	166,2	214,4	174,3
Janvier	1984	144,5	249,2	295,9	502,3
Moyenne mensuelle		136,7	251,8	219,5	318,5
Février	1976	63,9	286,6	87,5	264,6
Février	1977	55,2	298,3	197,1	285,5
Février	1978	115,8	148,9	203,7	227,8
Février	1979	90,2	344,8	222,9	238,2
Février	1980	95,5	269,5	266,6	251,8
Février	1981	91,8	348,21	210,8	365,0
Février	1982	50,0	294,8	184,0	195,4
Février	1983	64,5	146,0	69,8	92,5
Février	1984	134,6	193,4	341,3	469,5
Moyenne mensuelle		84,6	258,9	198,2	265,6
Mars	1976	110,3	226,2	196,0	325,7
Mars	1977	59,0	126,9	156,0	214,7
Mars	1978	49,6	221,0	91,0	165,5
Mars	1979	91,8	343,4	202,9	289,7
Mars	1980	133,1	421,8	285,2	336,6
Mars	1981	62,3	129,3	124,3	167,4
Mars	1982	73,0	252,6	138,6	264,2
Mars	1983	<b>5,6</b>	50,5	52,2	58,4
Mars	1984	146,9	284,8	<b>4,0</b>	395,5
Moyenne mensuelle		81,3	228,5	138,9	246,4
Avril	1976	<b>0,0</b>	42,4	26,0	<b>0,0</b>
Avril	1977	1,4	87,0	59,4	167,5
Avril	1978	58,3	68,9	92,8	55,7
Avril	1979	11,7	48,3	48,4	29,7
Avril	1980	13,6	46,2	30,7	27,9
Avril	1981	48,0	108,3	79,0	94,2
Avril	1982	36,1	105,1	90,7	96,3
Avril	1983	7,8	36,0	12,4	32,21
Avril	1984	1,8	45,7	49,2	17,5
Moyenne mensuelle		19,9	65,3	54,3	57,9
Mai	1976	1,0	9,5	19,3	20,0
Mai	1977	6,5	3,6	12,0	41,3
Mai	1978	0,0	1,0	13,0	0,0
Mai	1979	0,0	1,0	10,8	0,0
Mai	1980	10,5	9,0	6,6	10,8
Mai	1981	0,2	0,0	0,0	4,1
Mai	1982	3,5	11,3	8,7	12,5
Mai	1983	4,0	14,1	9,7	12,6
Mai	1984	0,01	15,31	0,01	4,4
Moyenne mensuelle		2,9	7,2	8,9	11,7

Mois	Année	Aeropuerto (mm)	Pinos (mm)	San Andres (mm)	Calderilla (mm)
Juin	1976	0,0	3,7	0,2	2,6
Juin	1977	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	1978	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	1979	9,5	7,7	3,8	4,8
Juin	1980	0,0	3,0	1,3	0,1
Juin	1981	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	1982	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	1983	0,0	0,0	2,9	0,0
Juin	1984	0,0	0,0	0,0	0,0
Moyenne mensuelle		1,1	1,6	0,9	0,8
Juillet	1976	0,0	0,0	0,5	0,0
Juillet	1977	0,0	1,0	0,0	0,0
Juillet	1978	0,0	0,0	0,0	0,0
Juillet	1979	21,0	26,4	20,7	13,5
Juillet	1980	0,0	0,0	0,2	0,0
Juillet	1981	2,0	0,0	0,7	0,0
Juillet	1982	0,0	0,0	0,0	0,0
Juillet	1983	1,1	9,6	4,8	2,1
Juillet	1984	0,0	0,0	0,0	0,0
Moyenne mensuelle		2,7	4,1	3,0	1,7
Août	1976	2,9	11,0	0,0	25,4
Août	1977	2,0	55,2	43,0	63,0
Août	1978	0,0	2,5	0,0	0,0
Août	1979	0,0	40,7	10,1	1,8
Août	1980	3,5	17,4	14,3	11,5
Août	1981	7,0	4,3	10,5	16,2
Août	1982	0,0	0,1	1,1	1,3
Août	1983	0,8	00	4,0	0,9
Août	1984	20,0	25,6	25,01	15,4
Moyenne mensuelle		4,0	17,4	12,0	15,1
Septembre	1976	6,3	27,3	9,3	19,8
Septembre	1977	17,1	36,9	36,0	57,0
Septembre	1978	1,0	2,5	23,8	6,0
Septembre	1979	0,0	12,4	2,8	10,0
Septembre	1980	0,0	0,0	0,0	0,0
Septembre	1981	4,5	1,5	11,9	10,4
Septembre	1982	0,2	01	19,8	11,2
Septembre	1983	7,4	208,5	6,8	99
Septembre	1984	0,6	4,0	0,0	1,5
Moyenne mensuelle		4,1	12,6	12,3	14,0
Octobre	1976	1,0	13,1	25,9	22,5
Octobre	1977	66,5	66,9	62,0	44,11
Octobre	1978	38,6	108,1	63,2	202,5
Octobre	1979	61,1	41,8	36,3	50,9
Octobre	1980	45,2	60,7	145,1	47,4
Octobre	1981	37,4	21,2	58,3	27,5
Octobre	1982	30,3	20,5	35,1	28,8
Octobre	1983	13,5	105,0	82,6	25,3
Octobre	1984	41,6	92,2	103,0	105,9
Moyenne mensuelle		37,2	68,8	67,9	61,7

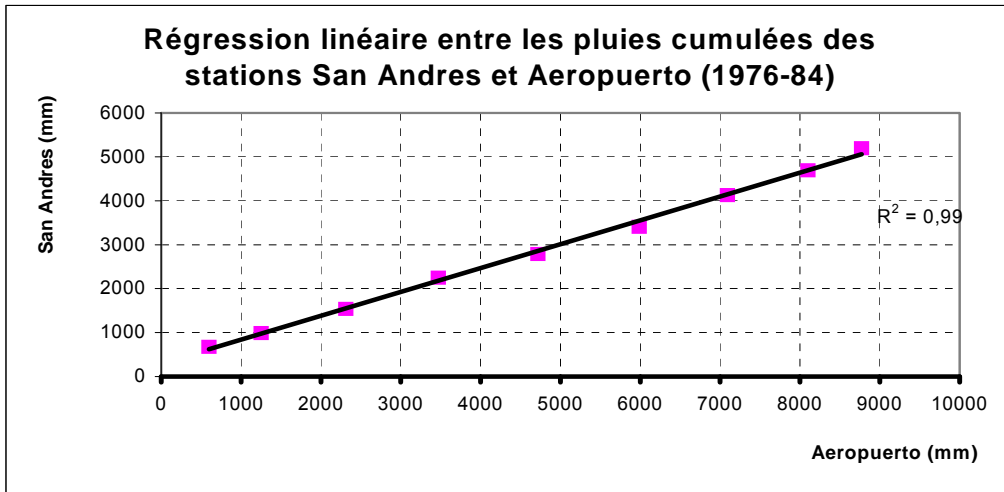
Mois	Année	Aeropuerto (mm)	Pinos (mm)	San Andres (mm)	Calderilla (mm)
Novembre	1976	49,5	78,0	91,9	32,7
Novembre	1977	61,1	159,5	119,0	169,7
Novembre	1978	77,2	155,8	198,1	38,9
Novembre	1979	78,5	100,7	146,9	134,0
Novembre	1980	24,4	124,0	63,4	63,1
Novembre	1981	133,8	340,4	201,0	155,6
Novembre	1982	22,3	70,9	141,5	51,8
Novembre	1983	76,0	124,5	84,0	142,0
Novembre	1984	65,4	106,4	59,0	139,3
Moyenne mensuelle		66,4	140,0	122,8	103,0
Décembre	1976	111,8	176,1	129,1	143,3
Décembre	1977	128,3	237,7	207,0	204,4
Décembre	1978	239,1	288,4	231,3	370,3
Décembre	1979	135,3	290,7	310,4	324,4
Décembre	1980	69,4	180,9	104,4	162,7
Décembre	1981	161,5	231,4	209,0	235,4
Décembre	1982	196,1	141,6	203,6	199,8
Décembre	1983	71,4	198,3	136,5	140,7
Décembre	1984	121,2	58,1	196,8	262,0
Moyenne mensuelle		137,1	200,4	192,0	227,0

En analysant le tableau II-10 des précipitations mensuelles et moyennes mensuelles, on constate que les mois ci-dessous présentent une valeur de la précipitation mensuelle très inférieure à la moyenne mensuelle:

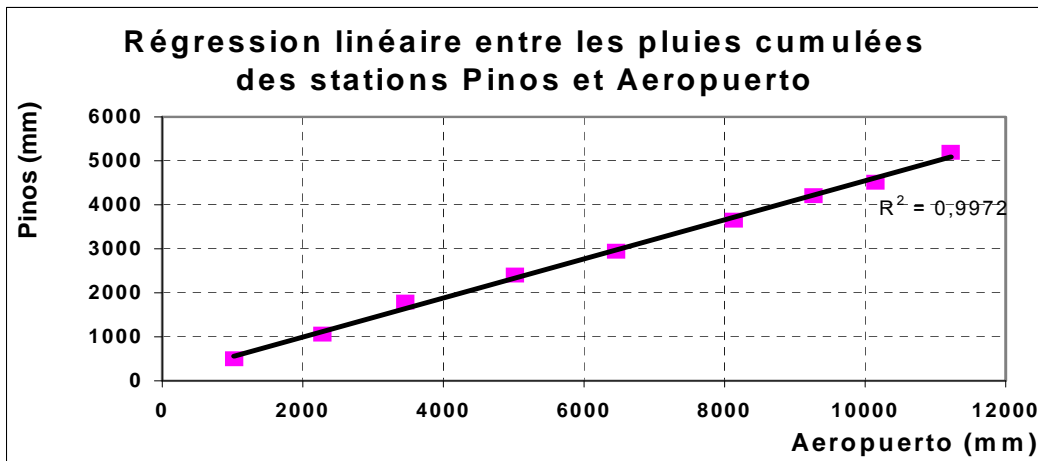
- Mars 1983, station Aeropuerto
- Mars 1984, station San Andres
- Avril 1976, stations Aeropuerto et Calderilla
- Octobre 1976, station Aeropuerto

On considère ces données comme aberrantes, car la différence avec les données des stations voisines est telle qu'elle ne peut être expliquée par une variation locale du climat. Remarquons cependant que l'année hydrologique 1983-84 est reprise en Bolivie comme une année *ninho*, ce qui pourrait expliquer en partie ces mois particulièrement secs (pas de référence pour 1976).

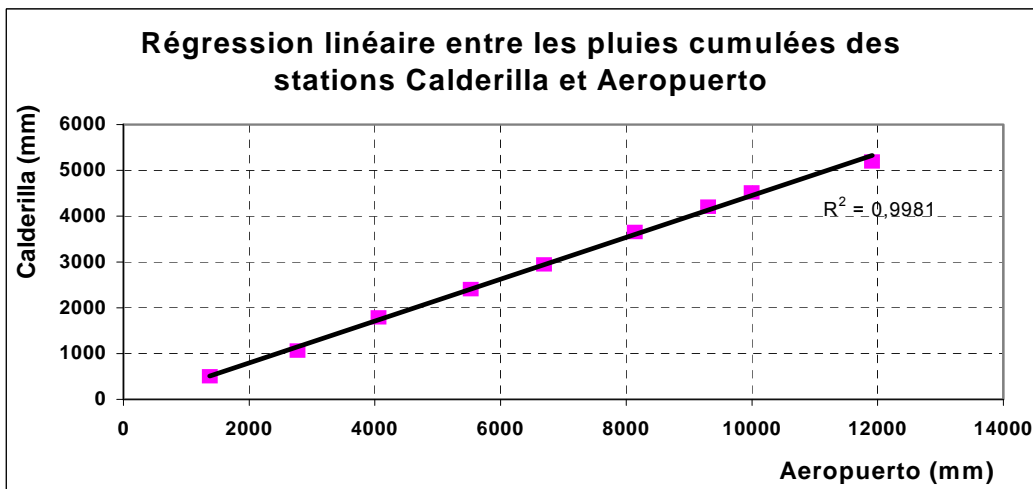
Pour écarter ces données aberrantes des échantillons des stations mentionnées pour la période 1976-1984, une analyse de corrélation est tout d'abord effectuée en comparant la courbe des valeurs annuelles cumulées des stations Pinos, San Andres et Calderilla avec celle de la station de référence Aeropuerto. La régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs en mm des précipitations journalières cumulées des stations de San Andres, Pinos et Calderilla avec la station de référence Aeropuerto aux dates correspondantes est présentée aux figures II-10 à II-12 sur la période de 1976 à 1984.



**FIGURE II-10: régression linéaire entre les précipitations journalières cumulées des stations météorologiques de San Andres et Aeropuerto aux dates correspondantes sur la période de 1976 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**



**FIGURE II-11: régression linéaire entre les précipitations journalières cumulées des stations de Pinos (pluviométrique) et Aeropuerto (météorologique) aux dates correspondantes sur la période de 1976 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

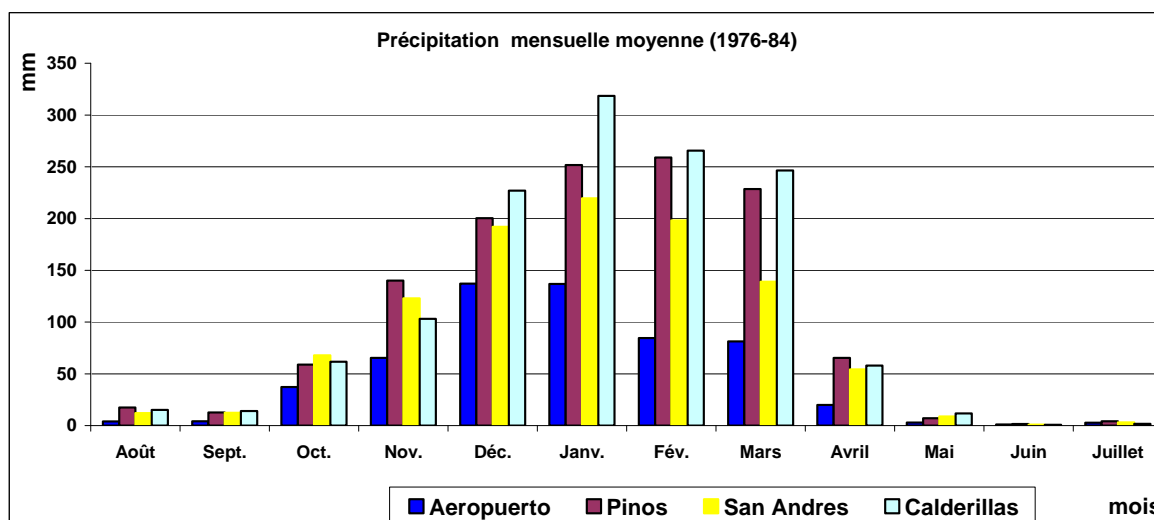


**FIGURE II-12: régression linéaire entre les précipitations journalières cumulées des stations de Calderilla (pluviométrique) et Aeropuerto (météorologique) aux dates correspondantes sur la période de 1976 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

L'analyse des trois régressions entre les valeurs des précipitations cumulées montre une corrélation presque parfaite avec une valeur du coefficient de régression de 0,99. La méthode du double cumul indique une très bonne homogénéité des données des stations de San Andres, Pinos et Calderilla par rapport à la station Aeropuerto prise comme référence.

En conclusion, l'analyse des données de précipitations montre que, pour la période de 1976 à 1984, les stations pluviométriques et météorologiques présentent une tendance uniforme et donc un registre de données pluviométriques de confiance. Aussi, les données aberrantes d'une station de mesure ont été estimées en prenant la moyenne de la valeur du jour précédent et du jour suivant de la station de référence ; le générateur climatique du modèle SWAT n'a alors pas été utilisé dans cette étude.

Le graphique de la figure II-13 donne, pour la période de 1976 à 1984, la précipitation mensuelle moyenne sous forme d'histogramme<sup>1</sup> des trois stations situées dans le bassin de la Tolomosa et la station Aeropuerto.



**FIGURE II-13: précipitation mensuelle moyenne des stations à l'intérieur du bassin et de la station de référence sur la période de 1976 à 1984 (source: adapté de SENAMHI, 2002) – Bassin de la Tolomosa**

On remarque que pratiquement toutes les stations enregistrent le mois de janvier comme le mois de plus grande précipitation.

#### II-4.2.3 ANALYSE DES TEMPERATURES JOURNALIERES

Le modèle SWAT n'utilise que les températures journalières maxima et minima. Cependant, on ne dispose de données journalières de température maximum et minimum pour la période choisie de 1976-1984 qu'à la station météorologique Aeropuerto. Le tableau II-12 présente les registres des températures maxima pour la station Aeropuerto ainsi que la déviation standard correspondante.

<sup>1</sup> Surface du rectangle est proportionnelle à la quantité de précipitation

**TABLEAU II-12: températures maxima mensuelles, mensuelles moyennes et déviations standards de la station météorologique Aeropuerto (1976 – 84) (adapté de SENAMHI, 2002)**

Mois	76 (°C)	77 (°C)	78 (°C)	79 (°C)	80 (°C)	81 (°C)	82 (°C)	83 (°C)	84 (°C)	Moyenne (°C)	Déviati on standard (°C)
Janvier	26,9	27,2	27,1	25,4	25,6	28,0	26,3	28,2	26,2	26,8	0,98
Février	26,1	28,5	26,4	25,7	26,8	27,5	26,6	27,1	27,6	26,9	0,86
Mars	25,4	27,8	26,9	22,9	26,5	27,1	25,5	28,5	26,5	26,4	1,63
Avril	24,9	25,2	23,5	23,1	27,6	26,1	24,8	28,1	23,3	25,2	1,81
Mai	23,3	23,5	24,2	23,8	26,1	28,1	25,2	25,9	27,9	25,3	1,81
Juin	22,6	24,6	23,6	20,8	23,2	23,4	26,2	23,2	25,7	23,7	1,63
Juillet	24,7	26,8	26,1	22,8	23,8	22,0	27,3	23,4	25,4	24,7	1,84
Août	24,2	24,3	22,1	28,2	25,0	25,8	27,4	25,0	23,0	25,0	1,94
Septembre	23,2	26,8	25,9	24,8	25,9	24,9	27,7	23,8	26,8	25,5	1,48
Octobre	28,8	27,5	28,4	28,5	27,2	26,0	28,2	28,3	29,3	28,0	0,98
Novembre	27,7	28,1	27,5	27,3	27,5	27,8	28,3	25,7	26,4	27,4	0,83
Décembre	27,9	27,1	25,0	27,1	28,4	27,5	27,1	27,6	25,6	27,0	1,08

L'analyse du tableau II-12 montre peu de changements dans la fluctuation des valeurs de la température mensuelle maximum. La déviation standard  $\sigma$  qui mesure la dispersion d'un échantillon de valeurs (température maximum) présente la valeur la plus élevée durant le mois d'août (1,94 °C).

Le tableau II-13 présente les températures minima mensuelles et mensuelles moyennes durant la période de 1976-1984 pour la station Aeropuerto ainsi que la déviation standard.

**TABLEAU II-13: températures minima mensuelles, mensuelles moyennes et déviations standards de la station météorologique Aeropuerto (1976 – 84) (source: SENAMHI, 2002)**

Mois	76 (°C)	77 (°C)	78 (°C)	79 (°C)	80 (°C)	81 (°C)	82 (°C)	83 (°C)	84 (°C)	Moyenne (°C)	Déviati on standard (°C)
Janvier	13,4	13,9	13,4	14,3	13,3	15,2	13,1	15,5	13,9	14,0	0,8
Février	13,1	14,7	14,4	13,6	14,0	13,5	13,7	14,6	14,8	14,0	0,6
Mars	11,9	13,9	13,4	13,4	14,2	12,4	13,0	13,6	15,0	13,4	0,9
Avril	7,6	10,4	10,9	9,7	11,2	11,1	11,5	11,9	11,0	10,6	1,3
Mai	4,6	5,9	4,9	6,4	5,8	6,6	4,8	7,5	6,3	5,9	1,0
Juin	1,4	2,2	2,3	3,7	3,9	1,0	3,0	2,3	2,2	2,2	1,2
Juillet	2,2	4,1	5,6	3,2	4,6	1,2	3,4	2,5	5,0	3,5	1,4
Août	3,9	3,9	3,7	7,4	6,7	6,6	7,0	4,9	3,7	5,3	1,6
Septembre	6,1	8,9	7,7	5,7	6,9	6,8	10,9	6,6	8,9	7,6	1,7
Octobre	10,3	10,3	12,1	12,3	12,1	10,5	12,2	10,5	14,1	11,6	1,3
Novembre	11,8	13,5	13,7	12,9	12,2	14,0	14,2	11,6	14,1	13,1	1,0
Décembre	12,9	13,3	13,6	14,5	13,6	13,7	14,8	13,7	13,9	13,8	0,6

L'analyse des données montre peu de fluctuation des valeurs de la température mensuelle minimum. La déviation standard  $\sigma$  qui mesure la dispersion d'un échantillon de valeurs (température minimum) présente la valeur la plus élevée durant le mois de septembre (1,7 °C).

#### II-4.2.4 ANALYSE DES DONNEES JOURNALIERES D'HUMIDITE RELATIVE

De la même manière que les températures, les données journalières d'humidité relative pour la période 1976-1984 ont été enregistrées à la station Aeropuerto.

Le tableau II-14 présente, pour la période 1976-84, l'humidité relative mensuelle et moyenne mensuelle pour la station Aeropuerto ainsi que la déviation standard correspondante.

**TABLEAU II-14: humidité relative mensuelle, moyenne mensuelle et déviations standards de la station météorologique Aeropuerto (1976–84) (source: SENAMHI, 2002)**

Mois	76 (%)	77 (%)	78 (%)	79 (%)	80 (%)	81 (%)	82 (%)	83 (%)	84 (%)	Moyenne (%)	Déviati on standard (%)
Janvier	63	64	65	71	71	63	65	60	70	66	3,7
Février	66	61	67	70	65	63	63	62	70	65	3,1
Mars	66	62	64	79	68	59	66	57	71	66	6,5
Avril	59	62	67	70	63	57	63	58	68	63	4,5
Mai	55	57	58	61	60	48	52	51	51	55	4,7
Juin	50	47	54	60	52	44	39	50	44	49	6,2
Juillet	46	39	47	58	38	46	40	47	39	44	6,4
Août	46	48	52	49	43	40	42	47	45	46	3,7
Septembre	54	55	44	51	37	42	45	51	46	47	5,9
Octobre	44	51	54	55	51	48	47	47	53	50	3,7
Novembre	53	60	60	60	50	56	53	59	63	57	4,4
Décembre	58	63	72	65	51	60	60	58	66	61	5,7

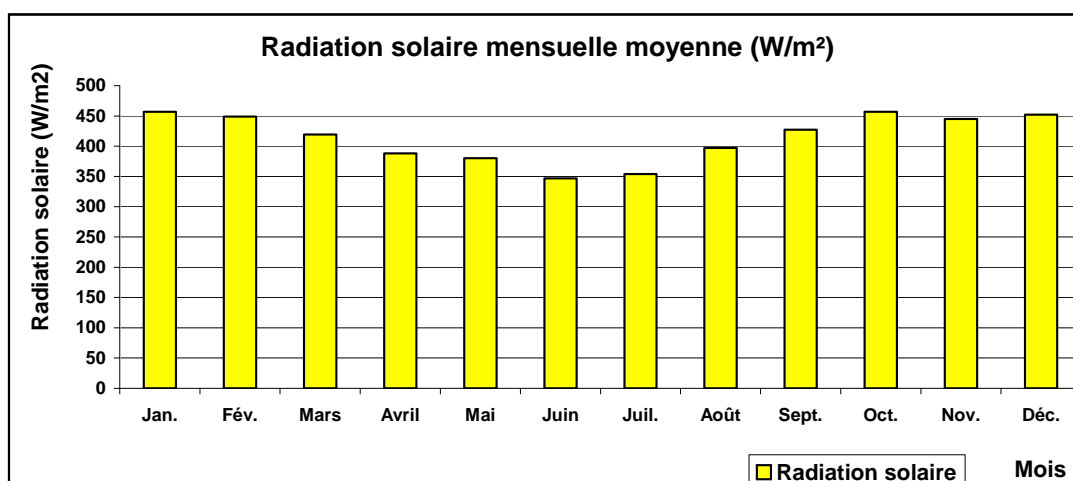
L'analyse des données montre peu de changements dans la fluctuation des valeurs. Le calcul de la déviation standard  $\sigma$  qui mesure la dispersion d'un échantillon de valeurs (humidité relative) montre que les valeurs mensuelles moyennes fluctuent dans des limites acceptables, avec une déviation standard maximum en mars de 6,5 %.

#### II-4.2.5 ANALYSE DE LA RADIATION SOLAIRE JOURNALIERE

Seule la station El Tejar, à un kilomètre de la station Aeropuerto, possède des registres d'observation de la radiation solaire ( $W/m^2$ ). Le tableau II-15 présente la radiation solaire mensuelle et moyenne mensuelle pour la période de 1976 à 1984, ainsi que la déviation standard.

A la lecture du tableau II-15, on constate que les mois de plus grande radiation solaire sont janvier et octobre avec une valeur moyenne de  $457.5 W/m^2$ . Les valeurs de déviation standard varient de 17 à  $45 W/m^2$ , valeurs acceptables vu l'amplitude des données des registres quotidiens de la variable.

La figure II-14 présente la distribution mensuelle moyenne de la radiation solaire sur la période de 1977 à 1984.



**FIGURE II-14: distribution mensuelle moyenne de la radiation solaire à la station météorologique El Tejar (1977–84) (source: SENAMHI, 2002)**

**TABLEAU II-15: valeurs mensuelles, moyennes mensuelles et déviations standards de la radiation solaire de la station météorologique El Tejar (1977 – 84) (source: SENAMHI, 2002)**

Mois	77 (W/m <sup>2</sup> )	78 (W/m <sup>2</sup> )	79 (W/m <sup>2</sup> )	80 (W/m <sup>2</sup> )	81 (W/m <sup>2</sup> )	82 (W/m <sup>2</sup> )	83 (W/m <sup>2</sup> )	84 (W/m <sup>2</sup> )	Moyenne (W/m <sup>2</sup> )	Déviacion standard (W/m <sup>2</sup> )
Janvier	461,0	469,4	450,1	435,5	429,8	511,1	435,7	411,3	457,5	33,6
Février	438,2	458,2	456,2	483,6	455,7	419,3	438,5	437,0	449,6	45,0
Mars	379,1	428,8	349,0	433,4	494,7	393,2	449,9	423,5	419,0	45,0
Avril	349,4	343,6	403,5	432,8	422,3	362,4	386,2	409,1	388,7	33,8
Mai	316,9	358,2	382,7	402,4	441,4	380,6	358,4	404,3	380,6	37,4
Juin	322,2	290,3	331,9	361,8	360,5	358,4	353,2	401,7	347,5	33,0
Juillet	321,9	350,8	353,3	371,2	352,4	353,9	329,7	399,6	354,1	23,9
Août	371,2	371,6	428,5	384,6	382,4	388,6	409,3	441,0	397,2	26,3
Septembre	413,3	462,1	434,9	425,9	412,3	457,3	365,2	439,6	427,6	32,3
Octobre	451,0	469,4	450,1	435,5	429,8	511,1	435,7	411,3	457,5	33,6
Novembre	430,2	482,6	456,3	475,0	469,7	449,2	362,7	439,6	445,3	35,5
Décembre	453,5	424,3	456,6	473,6	452,7	450,0	437,3	437,9	451,9	16,7

## II-4.3 MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

Le modèle numérique de terrain (MNT ou DEM<sup>1</sup>) est une représentation de l'altimétrie par un calculateur numérique. Il permet de calculer automatiquement les caractéristiques géométriques des unités hydrologiques (aire, pente, distance entre unités, distance au réseau hydrographique) et des tronçons (longueur, pente), la délimitation des sous-bassins en fonction du seuil de superficie imposé par l'utilisateur (surface seuil) et le réseau hydrographique.

La précision du DEM correspond à la dimension de ses pixels. Précisons déjà que la superficie du bassin versant de la Tolomosa calculé par le MNT est de 419 km<sup>2</sup> alors que celle calculée précédemment par planimétrie est de 437 km<sup>2</sup>.

### II-4.3.1 CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

Les courbes de niveau des cartes topographiques 6628I, 6628IV, 6626II et 6629III au 1/50.000 de l'IGM ont été numérisées manuellement sur une table numérique chaque 100 m pour les parties montagneuses et chaque 40 m ou 20 m pour les plaines. Ensuite, l'extension *3DAnalyst* (ArcView) interpole les données par triangulation de manière à former un fichier TIN (*triangulated irregular network*) pour déterminer l'altimétrie et donc la pente du terrain (passage à la vue en trois dimensions). Chaque triangle est limité par trois points avec une valeur unique en X, Y, Z et possède un angle de pente et une direction de pente constante. Il est la représentation vectorielle de la forme brute du terrain nu. D'autres interpolations intermédiaires sont nécessaires en fonction de la distance entre les courbes de niveau.

### II-4.3.2 VALIDATION

La qualité du MNT est jugée par différents critères tels que l'analyse visuelle de la superposition d'axes de thalweg ou de la superficie du réservoir de San Jacinto qui sont identifiés sur l'image satellitaire et comparés avec ceux générés par le MNT lui-même.

Le choix de la résolution des pixels peut influencer les caractéristiques topographiques et la taille des sous-bassins. Une petite résolution conduit par exemple à une topographie moins accidentée du sous-bassin (Thieken et al., cité par Heuvelmans, 2005). Des tentatives de MNT à la précision de 5 et 10 m ont été menées, suite à la constatation que la plupart des cours d'eau ont une largeur moyenne inférieure à 10 mètres. Cependant, le temps de calcul nécessaire au modèle et son interface AvSWAT était trop long avec les moyens informatiques à disposition (plus d'une heure pour le DEM *processing*, sur Intel 1.4 GHz, 512 SDRAM). Ce retard se répétait d'ailleurs à toutes les étapes d'AvSWAT, ce dernier travaillant essentiellement sur la base du MNT, et donc à la précision choisie du MNT. Par ailleurs, avec une précision de 5 m du MNT, une erreur numérique apparaît: le bassin-versant s'ouvre de toutes parts à des cours d'eau ne lui appartenant pas (l'erreur ne se produit plus avec une précision de 10 m).

A partir d'une précision de 20 m, les temps de calcul deviennent tout à fait raisonnables avec les moyens informatiques définis ci-dessus. En fonction des MNT de maillage de 20, 25 et 30 m réalisés et superposés à l'image satellitaire, il ressort que les correspondances sont acceptables et que les MNT de pixels 25 et 30 m sont fort proches et présentent les meilleures performances selon les critères retenus. Le MNT de maillage 30 m par 30 m paraît malgré tout meilleur dans les zones de piémonts et montagneuses, mais semble lisser la zone fluvio-lacustre située en plaine (Demarcin, 2006). Certaines zones du bassin présentent en effet une topographie plate ou en marches d'escalier (gradins) à cause vraisemblablement d'une mauvaise discrétisation des données topographiques souvent due à une question d'échelle. Il est probable aussi que des cuvettes et des petits alpages créés à la faveur de surplombs rocheux situés sur les versants ainsi qu'une partie des ravines dans la partie nord-est du bassin ne sont pas pris en compte par les isohypses des cartes topographiques utilisées.

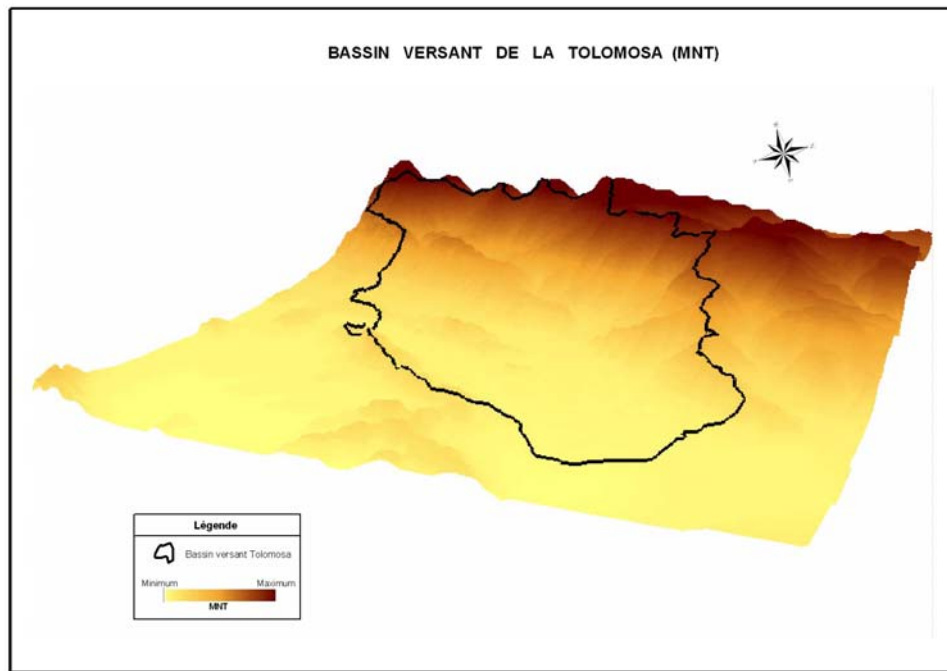
On constate aussi que, avec le maillage de 30 m par 30 m, la génération automatique par SWAT du réseau hydrographique à partir du MNT et sa visualisation grâce à l'interface AvSWAT, suivent globalement le tracé des cours d'eau tel qu'il est observé sur l'image. Cependant, à cause de petites erreurs dans le MNT mentionnées ci-dessus, des écarts par rapport au réseau hydrographique réel

---

<sup>1</sup> DEM (*digital elevation model*)

sont observés dans les lits mineurs ou dans des zones de faible relief avec des réseaux hydrographiques anastomosés. Aussi, le réseau hydrographique numérisé au 1/50.000 a été utilisé comme référence et a été imprimé dans le MNT (*burn in option*). Cette option permet de forcer le tracé hydrographique sur un tracé numérisé. Malgré ses limitations, la maille de 30 m par 30 m est considérée comme adéquate sur le plan hydrologique.

Via le module *3DAnalyst ArcScene*, les figures II-15 et II-16 donnent respectivement une vue en relief du MNT et en perspective de l'image satellitaire du bassin versant de la Tolomosa. L'échelle verticale est exagérée (multipliée par un facteur 2,5) pour permettre une meilleure vue du bassin.



**FIGURE II-15: vue en relief du MNT et du périmètre du bassin – Bassin de la Tolomosa**

## II-4.4 DONNEES CARTOGRAPHIQUES

Beaucoup de données biophysiques intéressantes à première vue ont dû être, soit rejetées pour leur imprécision ou leur inconsistance, soit validées par les sorties de terrain ou grâce au croisement de l'information tirée des cartes établies. On a aussi été confronté à de sérieuses difficultés d'intégration des données existantes, y compris au niveau du vocabulaire.

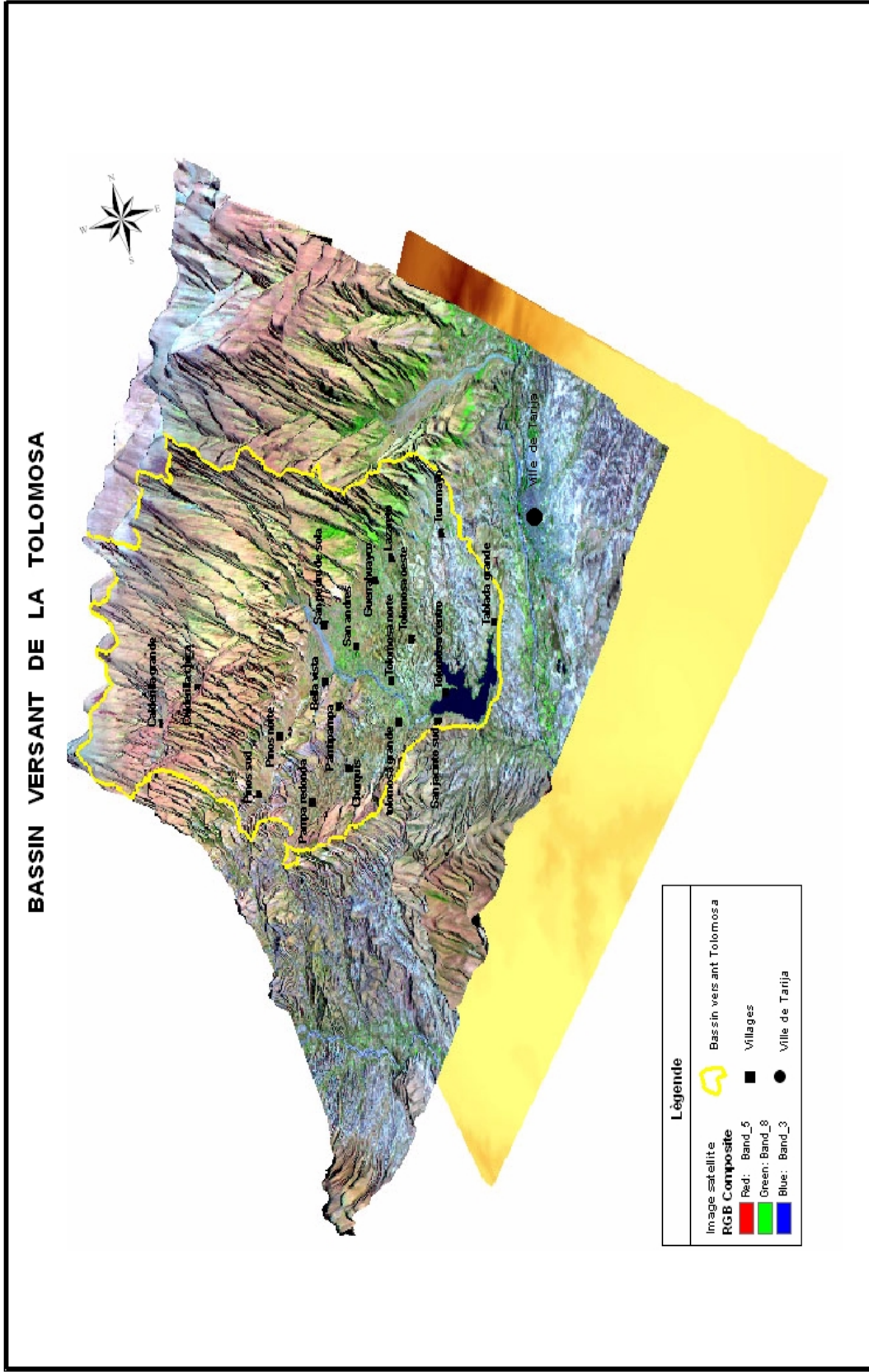
On considère que les sous-bassins de Sola, Molino, Seco, Pajcha, Tablada et Amont Réservoir ne forment plus qu'un seul sous-bassin appelé TolomosaA (confer point III-1).

### II-4.4.1 CARTE D'OCCUPATION DES TERRES

Le modèle hydrologique SWAT utilise sa propre nomenclature pour la classification des classes d'occupation des terres, dont les caractéristiques font partie de sa base de données. Aussi, les dix-sept classes d'occupation des terres déterminées préalablement suivant la nomenclature FAO\_UNESCO (confer tableau I-12) ont été réorganisées en treize classes majoritaires d'occupation des terres suivant la nomenclature utilisée par le modèle SWAT.

La correspondance s'est faite sur base de photographies, de descriptions et d'indications trouvées dans le manuel SWAT (Neitsch et al., 2002) et sur le site du modèle ([www.brc.tamus.edu](http://www.brc.tamus.edu)). Les treize classes dominantes ou majoritaires d'occupation des terres et leurs descriptions sont reprises dans le tableau II-16.

Le détail du passage de la nomenclature FAO-UNESCO à la nomenclature SWAT se trouve à l'annexe II-2. Ce passage à la nomenclature SWAT a dû parfois se faire aux dépens de la précision dans la description de la classe.



**FIGURE II-16:** vue en perspective tridimensionnelle en couleurs réelles de l'image satellitaire du bassin – Bassin de la Tolomosa

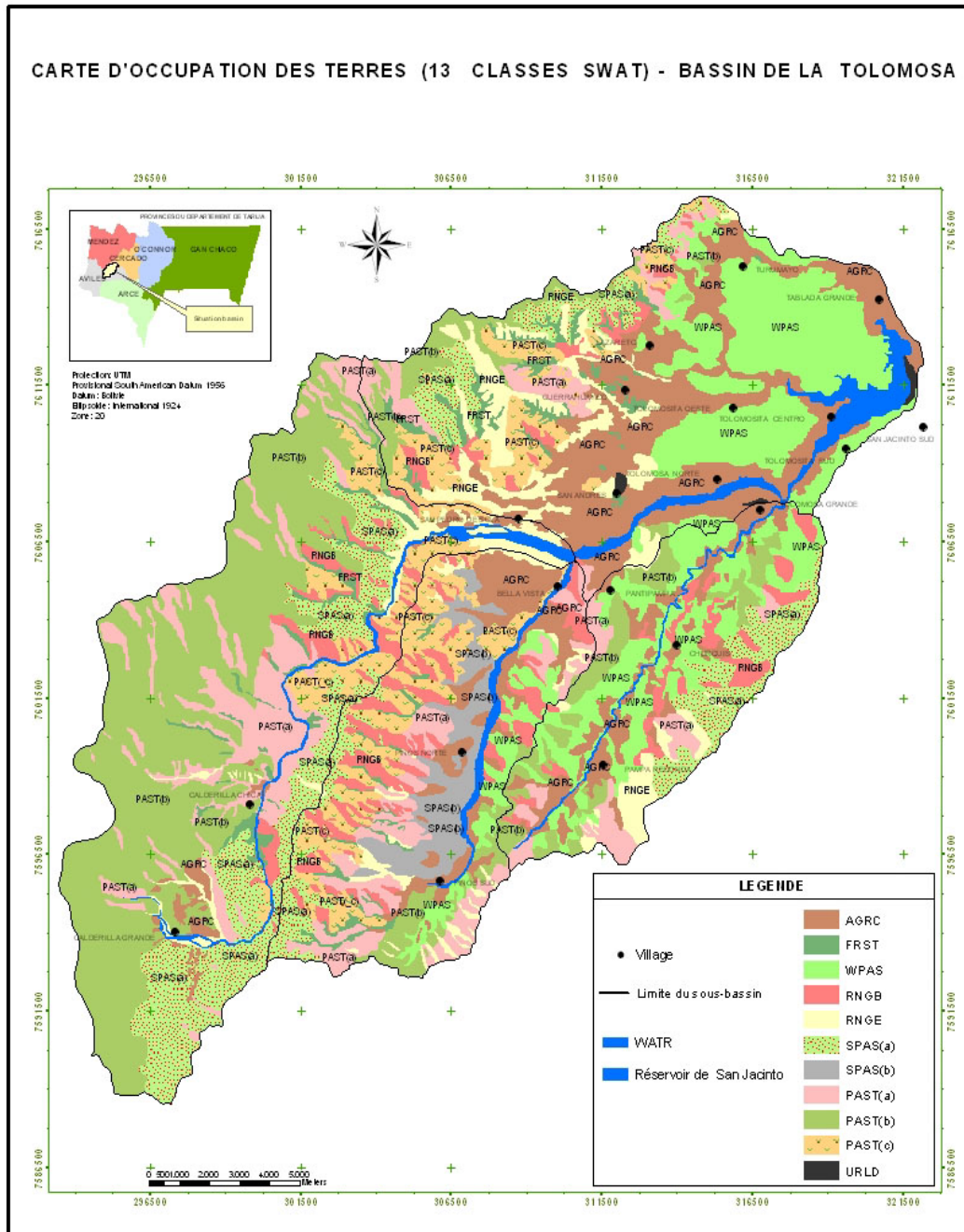
**TABLEAU II-16: classe dominante d'occupation des terres et superficie (nomenclature SWAT) – Bassin de la Tolomosa**

Classe (unité SWAT)	N°	Superficie		Description
		(ha)	(%)	
FRST	1	1.176	2.7	Forêts claires à semi-denses, à feuilles persistantes ou parfois caduques Etage écologique principalement montagnoux, surtout de 2.400 à 3.000 m et parfois subalpin Élevage extensif de bovins et récolte de bois de chauffe (sylvo-pastoral)
RNGB	2	2.650	6.1	Broussailles arborescentes basses ( <i>matorrals</i> ) semi-denses à feuilles persistantes ou parfois caduques dues à la sécheresse Etage écologique montagnoux (2.050 m à 2.400 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins, ovins et caprins
RNGE	3	2.561	5.8	Broussailles arborescentes basses ( <i>matorrals</i> ) denses à peu fournies à feuilles caduques Etage écologique surtout montagnoux (2.400 m à 3.000 m) et parfois subalpin Pâturages avec élevage extensif de bovins et ovins et récolte de bois de chauffe (sylvo-pastoral)
WPAS	4	6.364	14,6	Broussailles épineuses xérophiles de taille élevée ( <i>matorrals</i> ), denses à semi-denses à feuilles caduques dues à la sécheresse Etage écologique montagnoux (1.820 m à 2.050 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins et ovins
SPAS(a)	5	4.989	11.4	Végétation herbacée semi-dense, graminées intermédiaires (50 cm à 2 m), avec synusie <sup>18</sup> arbustive Etage écologique montagnoux (2.400 m à 3.000 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins et ovins
SPAS(b)	6	1.093	2.5	Végétation herbacée semi-dense, graminées intermédiaires (50 cm à 2 m), sans synusie arbustive et groupées en touffe ( <i>amacollado</i> ) Etage écologique montagnoux (2.050 m à 2.400 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins et ovins et cultures agricoles dispersées
PAST(a)	7	3.846	8.8	Végétation herbacée semi-dense, graminées basses (< 50 cm), avec synusie arbustive Etage écologique montagnoux (2.050 m à 2.400 m et 2.400 m à 3.000 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins, ovins et caprins (mixte)
PAST(b)	8	9.387	21.5	Végétation herbacée semi-dense avec graminées basses (< 50 cm), sans synusie arbustive Etage écologique montagnoux (1.820 m à 2.050 m et 2.050 m à 2.400 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins ou de bovins et ovins
PAST(c)	9	4.143	9.5	Végétation herbacée semi-dense, graminées basses (< 50 cm), mixtes (présence d'autres graminées sans prédominance d'une espèce) Etage écologique montagnoux (2.050 m à 2.400 m et 2.400 m à 3.000 m) Pâturages avec élevage extensif de bovins et ovins ou avec élevage mixte
AGRC	10	6.192	14.2	Zones anthropiques Agriculture intensive irriguée avec cultures annuelles et pérennes (fruits) Agriculture extensive sans irrigation avec cultures annuelles et pérennes (fruits)
WATR	11	739	1.7	Plaine alluviale
EMBASE	12	469	1,1	Réservoir de San Jacinto
URLD	13	72	0.2	Urbanisation à faible densité
<b>TOTAL</b>		<b>43.672</b>	<b>100</b>	

<sup>18</sup> Communauté végétale proche par leur comportement écologique

A la lecture du tableau II-16, on constate qu'environ 85 % de la superficie du bassin versant sont couverts par des pâturages avec un élevage extensif de bovins et ovins. Le reste de la surface est cultivé sous forme intensive (14 %). La couverture végétale dominante est principalement composée de broussailles (*matorral*) denses à semi-denses et de végétation herbacée (graminoïdes intermédiaires et basses).

La représentation des treize unités classées et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure II-17.



**FIGURE II-17: carte des classes d'occupation des terres (terminologie SWAT) – Bassin de la Tolomosa**

Le tableau II-17 indique par sous-bassin la surface des différentes classes d'occupation des terres du bassin versant.

**TABLEAU II-17: classes d'occupation des terres et superficie par sous-bassin - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Superficie		Occupation des terres		
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(SWAT)	(ha)	(%)
Tolomosa A	130,0	31	<b>WPAS</b>	3.689	<b>28</b>
			AGRC	3.340	26
			PAST	2.134	16
			Autres		
Mena	64,2	15	<b>WPAS</b>	2.021	<b>31</b>
			PAST	1.484	23
			AGRC	1.009	16
			Autres		
Sola	143,2	34	<b>PAST</b>	9.767	<b>68</b>
			SPAS	2.576	18
Pinos	81,8	20	<b>PAST</b>	2.795	<b>34</b>
			RNGB	1.165	14
			AGRC	1.164	14
			Autres		
<b>TOTAL</b>	<b>419,0</b>	<b>100</b>			

#### II-4.4.2 CARTE DES SOLS

L'utilisation du modèle hydrologique SWAT choisi exige de passer de la classification taxonomique des sols FAO (1990) à celle de la USDA (1998) afin de pouvoir utiliser la base de données incorporée à ce modèle.

La classification américaine utilise la notion d'horizons de diagnostic, ceux-ci étant définis, décrits et analysés selon des normes bien déterminées et standardisées. Ces horizons de diagnostic se répartissent en deux groupes:

- Horizons de surface ou "épipedon", englobant les horizons superficiels du profil, où la présence de matière organique est directement décelable
- Horizons de profondeur (en gros, les horizons B)

Les vingt-quatre unités cartographiques de la carte des sols du bassin versant (confer carte de la figure I-8), regroupées en treize unités dominantes et converties dans la nomenclature USDA, sont introduites et stockées dans le fichier dbf *User Soil* de l'interface AvSWAT. Le détail du passage de la classification taxonomique des sols FAO à celle de la USDA se trouve à annexe II-3.

Le tableau II-18 donne les unités dominantes des sols du bassin. Un groupe hydrologique est attribué aux différentes unités des sols suivant la méthode SCS (confer tableau II-1), en tenant principalement compte de la texture dominante et des caractéristiques de l'unité géomorphologique dans laquelle se trouve cette unité des sols. La correspondance entre les unités géomorphologiques et des sols a été obtenue grâce au croisement de l'information entre la carte des sols et celle des unités géomorphologiques (confer carte de la figure I-7). Le numéro entre parenthèses associé à certaines unités USDA des sols permet de différencier l'association des sols (confer annexe II-3).

**TABLEAU II-18: unités pédologiques USDA et FAO et superficie, groupe hydrologique (GH) et texture correspondante - Bassin de la Tolomosa**

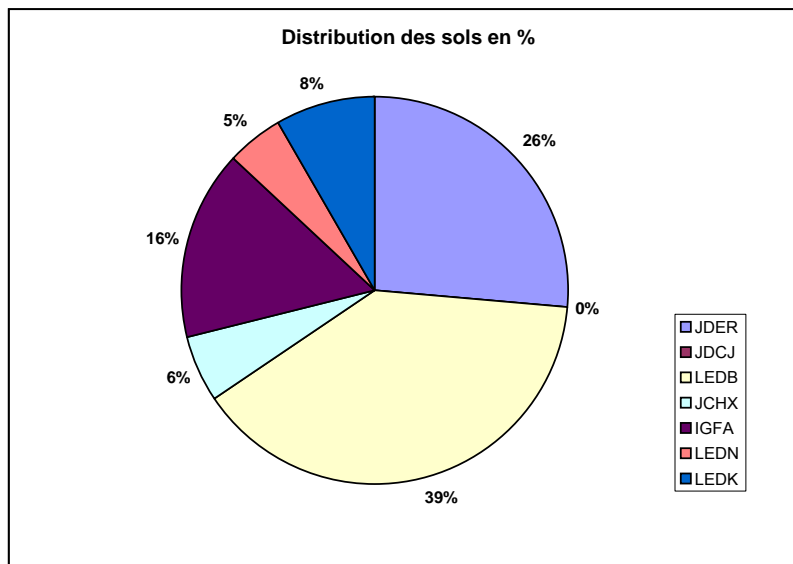
N°	Unité FAO	Texture par horizon (1)	Superficie		GH (SCS)	Unité USDA (*)
			(ha)	(% du total bassin)		
1	Consociation cambisol	F-Y-Y	4.051	10	B	JDER
2	Association cambisol-lixisol	Y-FY-Y-	4.028	10	C	JDER(2)
3	Association fluvisol-régosol	F-FYL-F	1.398	3	B	JDCJ
4	Association leptosol-cambisol	FA-FA	2.122	5	B	LEDB
5	Association leptosol-régosol	FL-F-FL	9.386	22	B	LEDB(2)
6	Consociation lixisol	F-Y-Y	2.282	5	C	JCHX
7	Consociation phaeozem	FL-L-FL	6.382	15	B	IGFA
8	Consociation régosol	F-FA	1.923	6	B	LEDN
9	Association régosol-cambisol-lixisol	F-FA-AF	3.421	8	B	LEDK
10	Consociation leptosol	F	4.292	10	B	LEDB(3)
11	Association cambisol-leptosol - phaeozem	FL	1.890	4	B	JDER(3)
12	Association régosol-cambisol-fluvisol	F-F-F	748	2	B	JDER(4)
13	Autre (rivières, lac, etc.)			1		

(\*) Le numéro entre parenthèses à côté du nom de l'unité des sols permet de différencier l'unité cartographique. Par exemple, JDER(4) (N°13) provient de l'association dominante régosol-cambisol-fluvisol alors que JDER(2) représente l'association cambisol-lixisol.

(1) Classe texturale (FAO,1990)

Y argileux F sablo-limoneux  
L limoneux A sablonneux

La répartition des sols dans le bassin versant de la Tolomosa est reprise schématiquement de la figure II-18.



**FIGURE II-18: schéma de la répartition des sols – Bassin de la Tolomosa**

On constate que l'unité dominante des sols dans le bassin versant est LEDB, correspondant à l'association leptosol–cambisol et leptosol–régosol et appartenant au groupe hydrologique B.

Le tableau II-19 indique, par sous-bassin, les sols rencontrés et leur superficie ainsi que le groupe hydrologique correspondant.

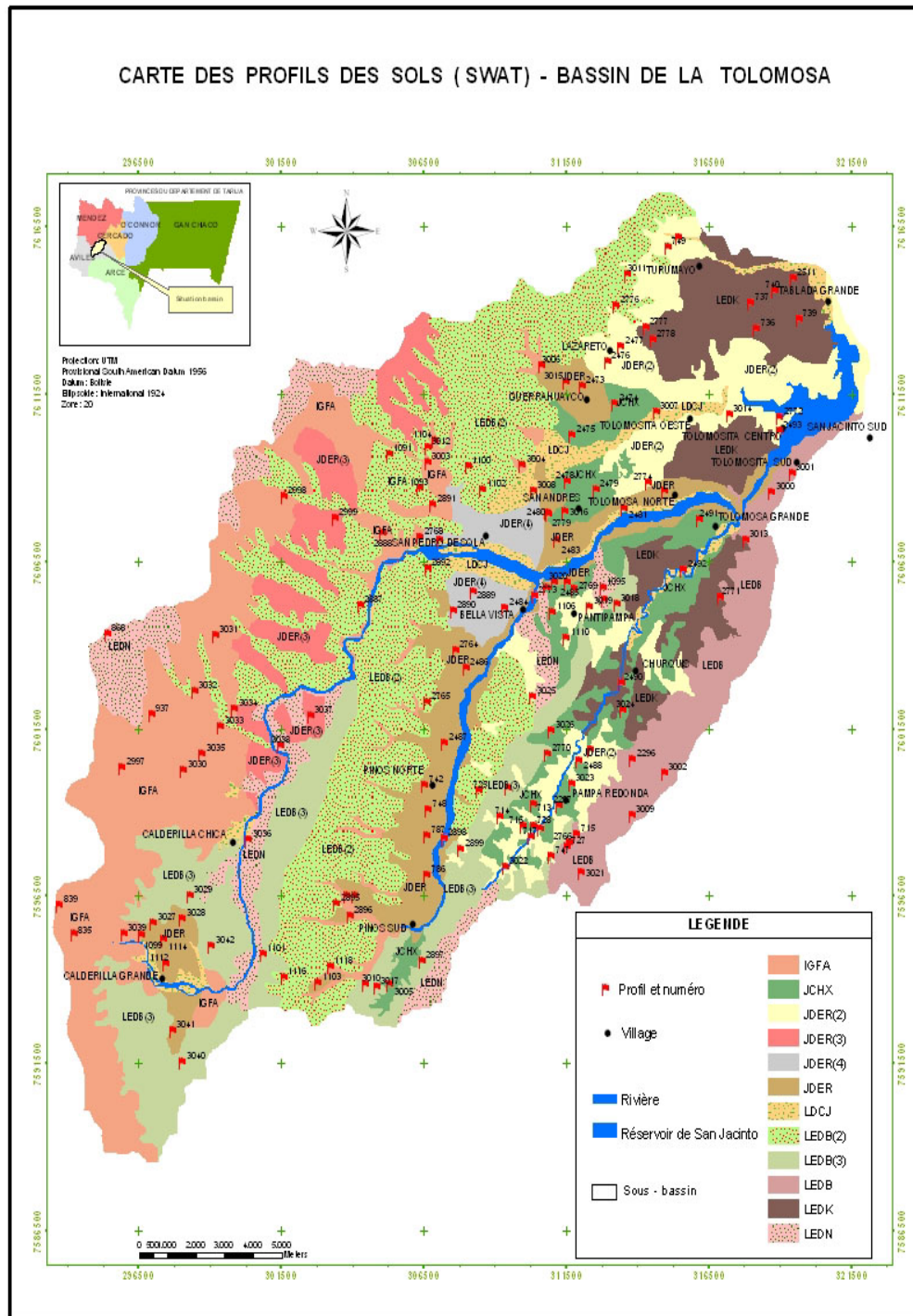
**TABLEAU II-19: surface des sols dominants et groupe hydrologique - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Superficie		Unité des sols			Groupe hydrologique (SCS)
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(USDA)	(ha)	(%)	
Tolomosa A	130,0	31	<b>LEDB(2)</b>	3.527	<b>27</b>	<b>B</b>
			JDER(2)	2.777	21	C
			LEDK	2.361	18	B
			Autre			
Mena	64,2	15	<b>LEDB</b>	1.895	<b>29</b>	<b>B</b>
			JCHX	1.299	20	C
			JDER(2)	1.063	17	C
			LEDK	1.059	16	B
Sola	143,2	34	<b>IGFA</b>	5.663	<b>40</b>	<b>B</b>
			LEDB(3)	2.527	18	B
			LEDB(2)	2.072	15	B
			Autre			
Pinos	81,8	20	<b>LEDB(2)</b>	3.731	<b>46</b>	<b>B</b>
			JDER	2.011	25	B
			LEDB(3)	1.015	12	B
			Autre			
<b>TOTAL</b>	<b>419,0</b>	<b>100</b>				

On constate que, pour trois sous-bassins, l'unité dominante des sols est LEDB qui correspond à l'association leptosol–cambisol et leptosol–régosol. Par contre, dans le sous-bassin Pinos, l'unité dominante est IGFA qui correspond à la consociation phaeozem.

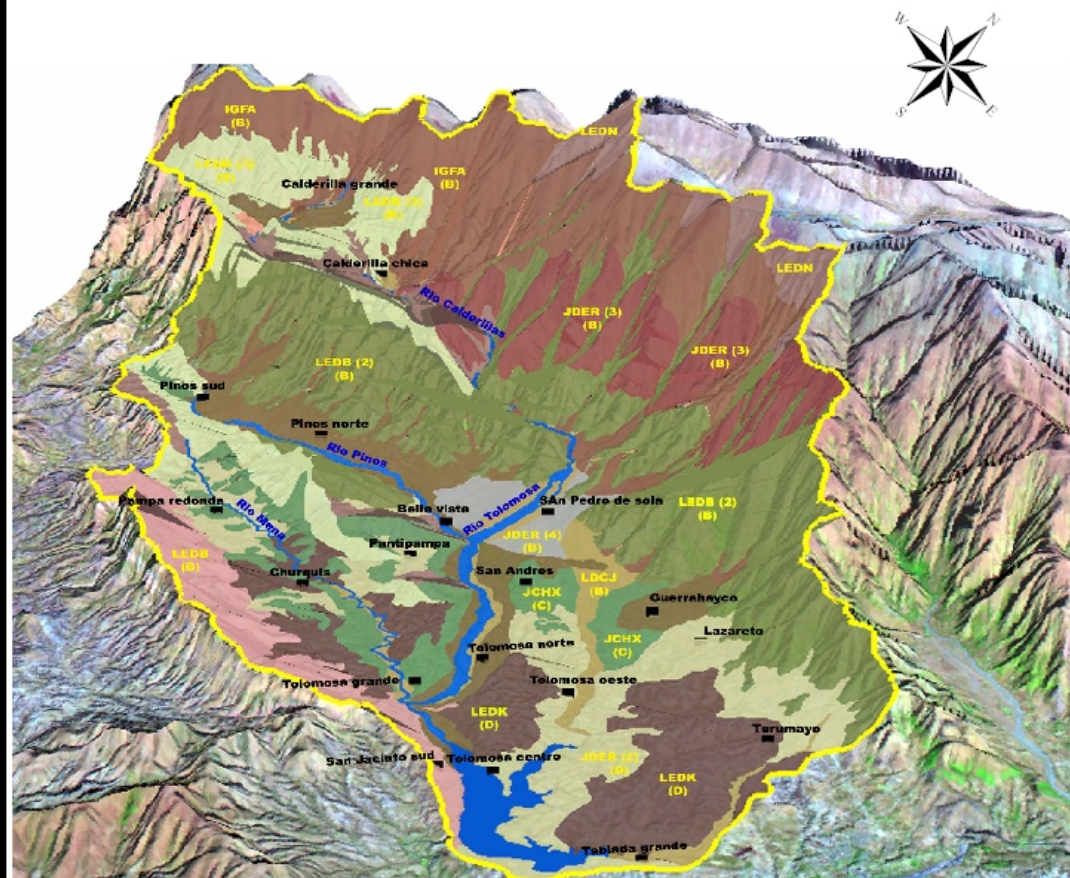
La carte de la figure II-19 montre la distribution des différentes unités des sols du bassin versant, ainsi que la localisation spatiale des 155 profils de sols étudiés.

Une vue en perspective de la carte des unités des sols est donnée de la figure II-20.



**FIGURE II-19: carte des unités des sols (nomenclature USDA) et localisation des profils étudiés - Bassin de la Tolomosa**

VUE EN 3D DES SOLS ET GROUPES HYDROLOGIQUES - BASSIN DE LA TOLOMOSA



LEGENDE				SIMB.
Nº	SOLS - SWAT	SOLS - FAO	GROUPES HYDROLOGIQUES	
1	JDER	Consociation cambisol	B	[Color-coded symbols for hydrological groups B, C, D]
2	JDER (2)	Association cambisol - lixisol	C	
3	LDCJ	Association fluvisol - regosol	B	
4	LEDB	Association leptosol - cambisol	B	
5	LEDB (2)	Association leptosol - regosol	B	
6	JCHX	Consociation lixisol	C	
7	IGFA	Consociation phaeozem	B	
8	LEDN	Consociation regosol	B	
9	LEDK	Association regosol - cambisol - lixisol	D	
10	LEDB (3)	Consociation leptosol	B	
11	JDER (3)	Association cambisol - leptosol - phaeozem	B	
12	JDER (4)	Association regosol - cambisol - fluvisol	B	

FIGURE II-20: vue en 3D des unités des sols et des groupes hydrologiques correspondants – Bassin de la Tolomosa

La présentation en trois dimensions de la carte des sols de la figure II-20 permet de mieux appréhender la localisation spatiale des différentes unités des sols du bassin versant ainsi que les groupes hydrologiques. On constate par exemple que l'unité IGFA s'étend sur la cime et les parties supérieures du bassin versant. Par contre, l'unité LEDK (groupe hydrologique D) se retrouve dans les parties fluvio-lacustres où le degré d'érosion est le plus sévère (confer carte de la figure I-10).

#### II-4.4.3 DONNEES ANNEXES

La base de données annexes associe à chaque classe des couches d'information du SIG, les données et paramètres pouvant être directement associés à cette classe.

##### II-4.4.3.1 Données associées à la carte de l'occupation des terres

Comme données associées à la carte de l'occupation des terres, nous avons la description des unités de couvertures végétales trouvées du bassin (classification FAO UNESCO 1973, adaptée par Zonisig(b), 2001 et classification SWAT).

##### II-4.4.3.2 Données associées à la carte des sols

Les données associées à la carte des sols sont sous forme de tableaux qui caractérisent chaque unité des sols du bassin. Néanmoins, ces caractéristiques ne sont pas toujours complètes pour toutes les unités et comprennent principalement:

- Coordonnées UTM du profil.
- Pourcentage pondéral en sable, limon et argile (en laboratoire).
- Epaisseur du profil.
- Texture (sur le terrain et en laboratoire).
- Conductivité électrique de l'échantillon saturé.
- Pourcentage de matière organique (en laboratoire).
- Perméabilité (FAO,1990).
- Drainage (FAO, 1990).

#### II-4.5 SEDIMENTATION DU RESERVOIR

La sédimentation du réservoir de San Jacinto est estimée par l'analyse des campagnes bathymétriques organisées en avril 1989 et en 1995 par le Service hydrographique naval bolivien et en août 2004 par l'entreprise Caryglobal srl. Les résultats de ces campagnes de mesures permettent de calculer le volume actuel d'eau du réservoir lors de son remplissage maximal, ainsi que le volume des sédiments accumulés dans le réservoir depuis la construction du barrage.

Les résultats principaux de la campagne bathymétrique de 2004 sont repris dans le tableau II-20.

**TABLEAU II-20: résultats de la campagne bathymétrique de 2004 (source: Caryglobal srl, 2004)**

Réservoir (1)	Unité	Valeur
Surface	m <sup>2</sup>	6.490.338
Périmètre	m	48.270
Volume du réservoir	m <sup>3</sup>	49.720.761
Volume des sédiments accumulés depuis 1989	m <sup>3</sup>	8.282.659

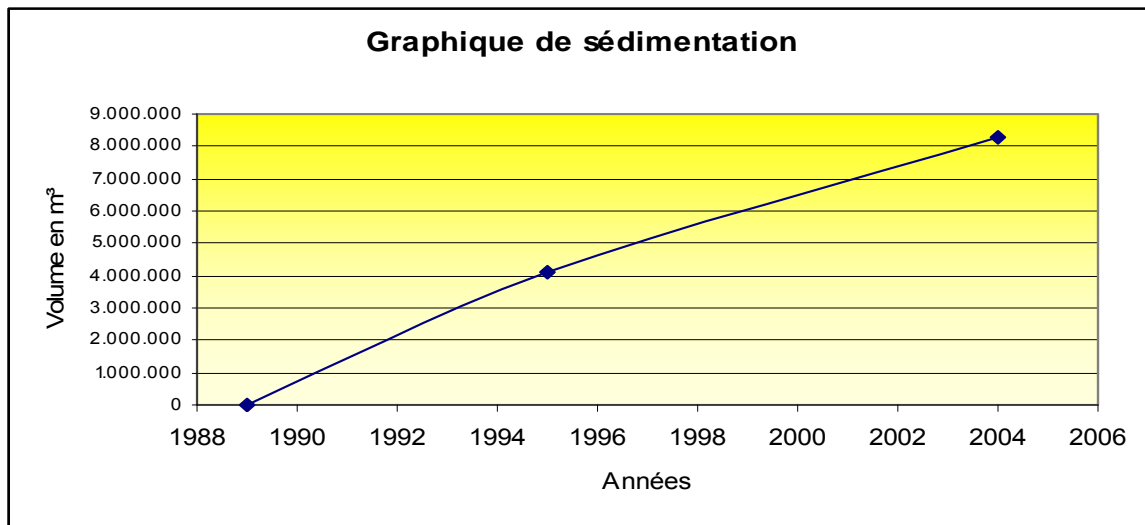
(1) Altitude du déversoir à 1.884,0 m

Le tableau II-21 compare les résultats entre les campagnes bathymétriques des années 1989, 1995 et 2004. Ce tableau indique une sédimentation dans le réservoir de 8.282.260 m<sup>3</sup> sur une période de 15 ans, c'est-à-dire une moyenne de 557.755 m<sup>3</sup>/an. Rapporté en hectare par an, ce taux de sédimentation représente un rendement en sédiment de 13,2 m<sup>3</sup>/ha/an.

**TABLEAU II-21: comparaison des résultats des campagnes bathymétriques de 1989, 1995 et 2004 (source: Caryglobal srl, 2004)**

Année	Volume maximum d'eau dans le réservoir (alt. 1.884 m) (m <sup>3</sup> )	Volume de sédiment accumulé dans le réservoir (m <sup>3</sup> )	Volume moyen annuel perdu pendant la période (m <sup>3</sup> )
1989 (mise en eau)	58.003.421	0	
1989 à 1995		4.121.722	686.953
1995	53.881.699		
1995 à 2004		4.160.938	
2004	49.720.761		462.326
Sédimentation totale (en m <sup>3</sup> )		8.282.660	
Sédimentation annuelle moyenne (en m <sup>3</sup> )		557.755	
Epaisseur moyenne de sédimentation annuelle (m)		0,099	

Le graphique de la figure II-21 indique sous forme linéaire l'accumulation de sédiments dans le réservoir de San Jacinto sur la période de 1989 à 2004 (source: Caryglobal srl).



**FIGURE II-21: courbe de sédimentation du réservoir de San Jacinto sur la période de 1989 à 2004 (source: Caryglobal srl)**

On constate un léger changement de pente de la droite à partir de 1995 qui correspond à une diminution de la sédimentation sur la période 1995 à 2004 par rapport à la période 1989 à 1995. Cela pourrait signifier, entre autres choses, que les actions de lutte antiérosive entreprises depuis 1995 commencent à porter leurs fruits (Programa ejecutivo de rehabilitacion de tierras PERTT; PEA(b), 1998). Cependant, cette tendance dégagée de l'analyse du graphique de la figure II-21 doit être interprétée avec prudence, vu le nombre réduit de données disponibles.

Six prises d'échantillons en état saturé ont été effectuées dans le réservoir à une profondeur de 50 cm maximum pour déterminer l'hydrométrie, le poids spécifique des solides et le poids spécifique apparent du sol sec. L'appareil utilisé comprend un système muni de deux mâchoires mécaniques lancé à partir d'une barquette et manipulé par deux opérateurs. Les mâchoires se referment au contact du fond du réservoir grâce à leur propre poids. L'hydrométrie nous permet de connaître le pourcentage de limon et d'argile dans l'échantillon prélevé. La détermination est basée sur la loi de Stokes avec la classification des particules (AASHTO) donnée dans le tableau II-22.

**TABLEAU II-22: taille des particules (AASHTO)**

Type	Taille de la particule (mm)
Gravier	> 4,75
Sable	4,75 – 0,075
Limon	0,075 – 0,02
Argile	< 0,002

Le tableau II-23 indique, pour chaque échantillon pris dans le réservoir, le pourcentage en limon et argile, ainsi que le poids spécifique des solides (rapport entre le poids de la partie solide de l'échantillon et le volume de l'échantillon) et le poids unitaire ou spécifique apparent (rapport entre le poids total du sol et le volume total, solide, liquide et gaz).

**TABLEAU II-23: pourcentage en limon et argile, poids spécifique des solides et poids unitaire ou spécifique apparent des échantillons prélevés dans le réservoir – Bassin de la Tolomosa**

Prise d'échantillon dans le réservoir	Unité	Numéro de l'échantillon				
		1	2	3	4	5
<b>Zone sud du réservoir</b>						
Limon	%		92,69	87,20		
Argile	%		7,31	12,80		
Poids spécifique	kgN/m <sup>3</sup>		26,29	26,02		
Poids spécifique apparent	kgN/m <sup>3</sup>		13,01	11,02		
<b>Zone nord du réservoir</b>						
Limon	%	87,90				
Argile	%	12,10				
Poids spécifique	kgN/m <sup>3</sup>	26,25				
Poids spécifique apparent	kgN/m <sup>3</sup>	9,67				
<b>Zone est du réservoir</b>						
Limon	%				83,23	
Argile	%				16,77	
Poids spécifique	kgN/m <sup>3</sup>				26,37	
Poids spécifique apparent	kgN/m <sup>3</sup>				8,71	
<b>Zone du barrage</b>						
Limon	%					88,4
Argile	%					11,6
Poids spécifique	kgN/m <sup>3</sup>					26,27
Poids spécifique apparent	kgN/m <sup>3</sup>					9,47

Ce tableau II-23 indique que, en règle générale, nous obtenons environ 85 % de limon et 15 % d'argile dans les échantillons prélevés dans le fond du réservoir. La moyenne pondérée des poids spécifiques unitaires apparents des cinq échantillons tirés du réservoir est de 11 kgN/m<sup>3</sup>. Ce poids spécifique apparent permet de calculer le taux de rendement annuel en sédiment du bassin versant, qui s'élève à 14,5 t/ha/an (13,2 m<sup>3</sup>/ha/an x 11 kgN/m<sup>3</sup> x 102 kg/kgN = 14.586 kg/ha/an = 14,5 t/ha/an, avec 1 kgN = 102 kg et 1 m<sup>3</sup> = 11 kg).

## II-5 CONCLUSIONS

Les données principales de chaque sous-bassin sont résumées dans le tableau II-24.

**TABLEAU II-24: résumé des données biophysiques par sous-bassin – Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Superficie		Pente moyen. (%)	Occupation des terres			Sol		
	(km <sup>2</sup> )	(%)		Unité	(ha)	(% sous-bassin)	Unité	(ha)	(% sous-bassin)
Tolomosa A	130	31	18	WPAS	3.689	28	LEDB(2)	3.527	27
Mena	64	15	16	WPAS	2.021	31	LEDB	1.895	29
Sola	143	34	41	PAST	9.767	68	IGFA	5.663	40
Pinos	82	20	25	PAST	2.795	34	LEDB(2)	3.761	46
<b>Bassin</b>	<b>419</b>	<b>100</b>							

Comme déjà mentionné, la modélisation hydrologique du bassin par l'emploi du modèle SWAT pose la question cruciale de la quantité disponible et la qualité des données, à la fois en termes scientifiques et en termes d'application. Malgré sa relative simplicité par rapport à d'autres modèles distribués, les paramètres restent nombreux, entre dix et vingt par HRU selon les processus pris en compte.

Une partie importante du temps passé pour mener à bien cette thèse a été consacrée à la collecte de données primaires (concernant principalement le sol et la végétation) et à la compilation des données secondaires existantes. Aussi, le modèle a été alimenté par différentes sources de données en fonction non seulement de leur disponibilité, mais aussi des coûts, du temps et des possibilités de traitements.

Les résultats de la modélisation sont évidemment conditionnés par la qualité et la précision des données introduites dans le modèle.

L'image satellitaire, corroborée par les sorties de terrain, s'est montrée particulièrement pertinente pour l'identification de l'occupation du sol puisqu'elle offre une représentation instantanée sur toute l'étendue du bassin versant, avec une résolution suffisamment fine (30 m). La cartographie par télédétection a permis une localisation plus précise et plus réaliste des éléments étudiés par rapport aux cartographies dérivées d'informations secondaires qui peuvent constituer une alternative, mais à un niveau de précision plus grossier.

Le nombre important de stations météorologiques autour et dans le bassin versant et la période relativement prolongée d'observations débimétriques disponibles à l'exutoire du bassin ont permis l'acquisition de données hydrométéorologiques d'une qualité et d'une résolution spatio-temporelle plus adéquates que dans le cas d'un bon nombre de données biophysiques. Cependant, nous n'avons pour tout le bassin versant qu'un seul point (l'exutoire) où des mesures débimétriques sont disponibles.

Les sols et leurs couvertures ont un rôle déterminant sur la modélisation des termes du bilan hydrique. Cependant, les cartes des sols manquent à des échelles adaptées et sur des surfaces étendues, ce qui constitue le problème majeur quant à leur utilisation. Les nombreuses sorties de terrain organisées tout au long de cette étude ont permis d'obtenir des compléments précieux d'information. Considérant que, selon l'histogramme des classes de pente (confer histogramme de la figure IV-6), 48% de la superficie du bassin ont une pente supérieure à 60%, rendant une grande partie de celui-ci pratiquement inaccessible, nous considérons la densité d'échantillonnage de 0,4 profil par km<sup>2</sup> comme représentative des sols trouvés dans le bassin étudié. Nous sommes conscients de la perte de précision entraînée par le passage à la nomenclature USDA et d'une certaine simplicité dans le regroupement retenu pour arriver à un nombre plus réduit d'unités dominantes des sols. Néanmoins, nous supposons que la précision est suffisante par rapport au niveau actuel des connaissances générales du terrain et pour une analyse à l'échelle annuelle et interannuelle du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

## **TROISIEME PARTIE**

### **MODELISATION DU BILAN EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA**



## III-1 DISCRETISATION SPATIALE DU BASSIN VERSANT

### III-1.1 SOUS-BASSINS

Le traitement des données morphologiques du bassin versant est réalisé par l'interface AvSWAT à partir du modèle numérique de terrain (MNT). Dans un premier temps, l'extension *automatic watershed definition tool* de l'interface AvSWAT détermine le réseau hydrographique, puis délimite les sous-bassins versants<sup>1</sup> et, enfin, le bassin versant lui-même. Ensuite, les caractéristiques des HRU sont définies par la superposition des données d'occupation des terres et de sol; elles ne sont liées qu'à un seul sous-bassin et donc à un seul cours d'eau. Rappelons que l'HRU est l'unité spatiale élémentaire de calcul de SWAT et se caractérise par une occupation unique du sol, un type unique de végétation et une topographie moyenne.

La surface minimum de chaque sous-bassin peut aussi être fixée par l'utilisateur en modifiant l'option surface seuil (*threshold area*), ainsi que le montre le tableau III-1.

**TABLEAU III-1: résultats de la simulation en fonction de la modification du paramètre surface seuil – Bassin de la Tolomosa**

Débit (m <sup>3</sup> /s)	Surface seuil (ha)					
	52	100	300	600	1.500	10.000
Débit moyen	9,5	9,8	9,4	9,4	9,5	9,6
Débit maximum	614,3	614,4	614,6	614,6	614,5	614,3
Ecart-type	41,9	41,9	41,9	42,0	42,0	41,9

On constate que la surface du bassin versant ne modifie pas significativement les débits simulés ainsi que le temps nécessaire à la simulation. La modification de ce paramètre modifie néanmoins le tracé du cours d'eau «le plus long» de chaque sous-bassin. Avec une surface seuil de 300 ha, le tracé correspond au tracé attendu.

Le tableau III-2 donne les résultats de simulation du débit à l'exutoire en fonction du découpage en sous-bassins. Ces simulations ont été réalisées avec l'option « *dominant land use and soil* » lors de la définition des superficies. La simulation a été réalisée sur 20 ans, avec une seule station climatique (San Andres) en mode stochastique (aléatoire).

**TABLEAU III-2: résultats de la simulation en fonction du nombre de bassins versants - Bassin de la Tolomosa**

Débit (m <sup>3</sup> /s)	Nombre de bassins versants (bv)						
	1 bv	2 bv	3 bv	4 bv	6 bv	8 bv	11 bv
Débit moyen	9,5	9,2	9,0	9,0	8,8	9,1	9,2
Débit maximum	614,3	440,7	341,4	341,5	354,4	337,8	614,5
Ecart-type	41,9	33,0	29,4	29,4	27,6	29,0	31,2

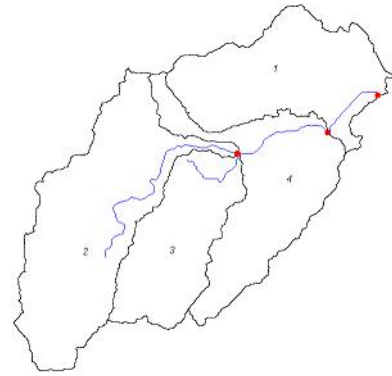
Les résultats laissent à penser que trois à six bassins versants seraient un excellent compromis entre un ou onze bassins versants. Il faut noter que seulement quelques mesures ponctuelles de débit ont été prises à l'intérieur du bassin de la Tolomosa. Par ailleurs, bien que l'on soit encore loin des débits maxima observés (environ 75 m<sup>3</sup>/s), 340 m<sup>3</sup>/s est une valeur beaucoup plus raisonnable que 614 m<sup>3</sup>/s. On explique difficilement les différences observées entre les différents découpages entrepris. Probablement que la définition et la répartition des HRU jouent un rôle important pour chaque sous-bassin versant.

Les figures III-1 à III-6 représentent différents découpages du bassin versant de la Tolomosa.

<sup>1</sup> Un sous-bassin est défini par un exutoire unique



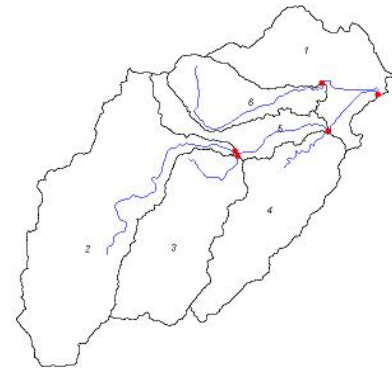
**FIGURE III-1: découpage du bassin de la Tolomosa en un sous-bassin**



**FIGURE III-4: découpage du bassin de la Tolomosa en quatre sous-basins**



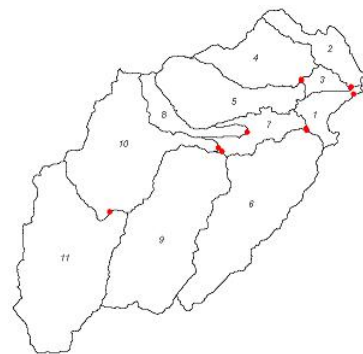
**FIGURE III-2: découpage du bassin de la Tolomosa en deux sous-basins**



**FIGURE III-5: découpage du bassin de la Tolomosa en six sous-basins**



**FIGURE III-3: découpage du bassin de la Tolomosa en trois sous-basins**



**FIGURE III-6: découpage du bassin de la Tolomosa en onze sous-basins**

### III-1.2 CARTE DES SOUS-BASSINS ET RESEAU HYDROGRAPHIQUE

La délimitation automatique par le modèle du bassin versant de la Tolomosa, considéré comme une surface hydrologiquement close, couvre une superficie totale de 419 km<sup>2</sup> (1.103 colonnes et 1.141 lignes sous format *grid*, dont la maille de 30 m x 30 m est égale au pixel de la photo satellite). Pour ce calcul de surface, le modèle utilise un format *grid* (MNT) et non un polygone. La surface du bassin ne considère que les pixels sur la frontière dont la pente permet un écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin considéré. D'une superficie de 436,7 km<sup>2</sup> calculée précédemment par planimétrie, nous sommes passés à 419 km<sup>2</sup>, ce qui représente environ une diminution de 4% de la superficie du bassin. Cette faible variation n'affecte en rien les résultats de l'étude.

Le tableau III-3 reprend les superficies du bassin et des quatre sous-bassins déterminées par le modèle, ainsi que la longueur des rivières du réseau hydrographique principal et la pente moyenne des sous-bassins.

**TABLEAU III-3: superficie, longueur du cours d'eau et pente moyenne par sous-bassin - Bassin de la Tolomosa**

Bassin et sous-bassins	Superficie		Longueur rivière (km)	Pente moyenne sous-bassin (%)
	(km <sup>2</sup> )	(%)		
<b>BASSIN</b>				
Tolomosa	419,0	100	64	23 (1)
<b>SOUS – BASSINS</b>				
TolomosaA	130,0	31	30	18
Mena	64,2	15	19	16
Sola	143,0	34	34	41
Pinos	81,8	20	17	25

(1) pondérée

Ce tableau III-3 montre que la pente moyenne pondérée du bassin est de 23%, ce qui correspond à un bassin montagneux. Le sous-bassin le plus pentu est Sola, avec une pente moyenne de 41%. Ce sous-bassin se trouve dans la partie sud-ouest du bassin versant et correspond à la partie la plus élevée en altitude.

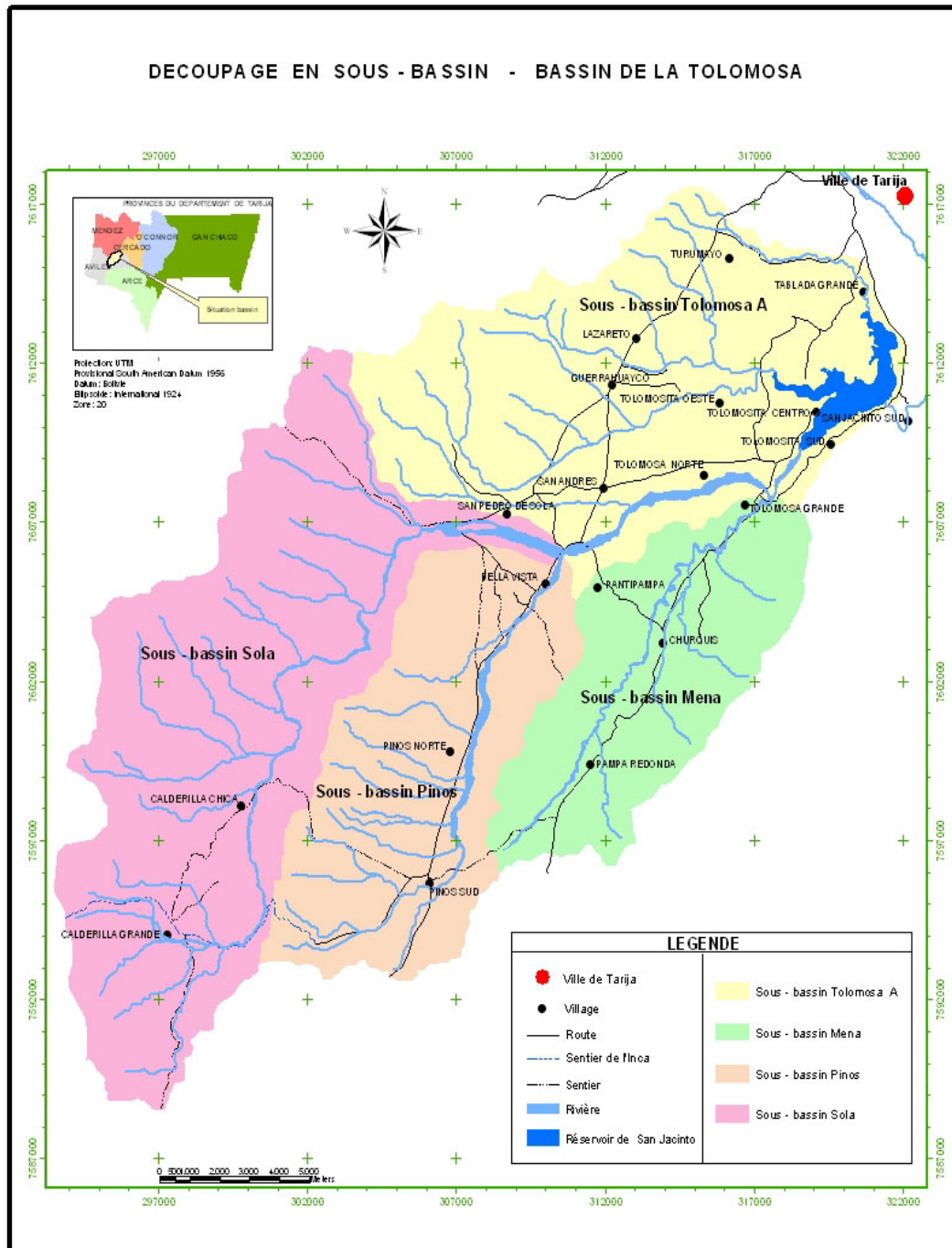
La figure III-7 représente le découpage du bassin versant en quatre sous-bassins, ainsi que le réseau hydrographique principal. Rappelons que le reportage photographique de l'annexe I-1 série D illustre le réseau hydrographique du bassin versant.

### III-2 JUSTIFICATION DES MODELISATIONS DU BILAN HYDRIQUE

En vue d'estimer le bilan en eau du bassin versant et l'impact de la mise en œuvre de scénarios de développement, sept modélisations différentes et plus de quatre cents simulations ont été exécutées durant la phase de calibrage.

La première modélisation, appelée TOLOSA, a été remplacée par TOLOSA1 (deuxième modélisation) en raison d'un apport supplémentaire de résultats d'analyse de profils de terrain décrits, qui a permis la correction des sols dominants par sous-bassin. Ces deux modélisations considèrent le paramètre CN<sub>2</sub> calculé par modèle<sup>1</sup> comme un paramètre pouvant être calibré sans tenir compte de l'effet des pentes. Les résultats de ces deux modélisations ne sont pas repris ici.

<sup>1</sup> SWAT calcule les CN<sub>2</sub> en fonction des conditions journalières d'humidité rencontrées



**FIGURE III-7: carte des sous-bassins et réseau hydrographique - Bassin de la Tolomosa**

Une troisième modélisation, appelée TOLOFI, a ensuite vu le jour. Elle inclut l'effet de la pente moyenne du sous-bassin via le  $CN_2$ , calculé par SWAT et transformé par nos soins en  $CN_{2s}$  par la relation développée par le Département d'Agriculture des Etats-Unis. Cette modélisation considère que le CN est seulement fonction des caractéristiques morphologiques du bassin versant telles que le type de sol, la végétation, l'occupation des terres, la topographie et les techniques d'aménagement, et n'est alors plus un paramètre pouvant être calibré.

La quatrième modélisation TOLOMAT estime le bilan en eau en utilisant les valeurs des CN non plus calculées par SWAT mais issues d'une matrice (classification « experts »). Elle a pour but de comparer les résultats obtenus entre la modélisation avec les CN calculés par SWAT et celle avec les CN estimés.

Cependant, une comparaison complète des bilans annuels en eau ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observations historiques, ce qui n'est pas le cas des modélisations précédentes pour lesquelles sont comparés les résultats relatifs aux observations pour l'ensemble des années si incomplètes soient-elles. La cinquième version TOLO3A considère seulement les trois premières années d'observations où les données observées sont les plus nombreuses, y compris celles des périodes de crue. A défaut de mieux, l'année 1 (1 août 77 au 31 juillet 78) est utilisée pour le calibrage et les deux années suivantes, pour la validation. Les CN issus de la matrice d'experts et du calcul par SWAT sont respectivement utilisés par cette modélisation.

Afin de mieux tenir compte de la diversité des sols et des couvertures végétales identifiés dans le bassin, la sixième modélisation TOLOHRU découpe le bassin en huit HRU au lieu des quatre HRU retenues par les modélisations précédentes et identifiées aux quatre sous-bassins.

Enfin, la dernière modélisation HRUFOR analyse l'effet du scénario de développement sylvo-pastoral sur le bilan en eau du bassin versant.

La modélisation s'est poursuivie par la simulation du rendement en sédiment du bassin versant.

La figure III-8 présente le schéma des différentes modélisations du bilan en eau du bassin versant.

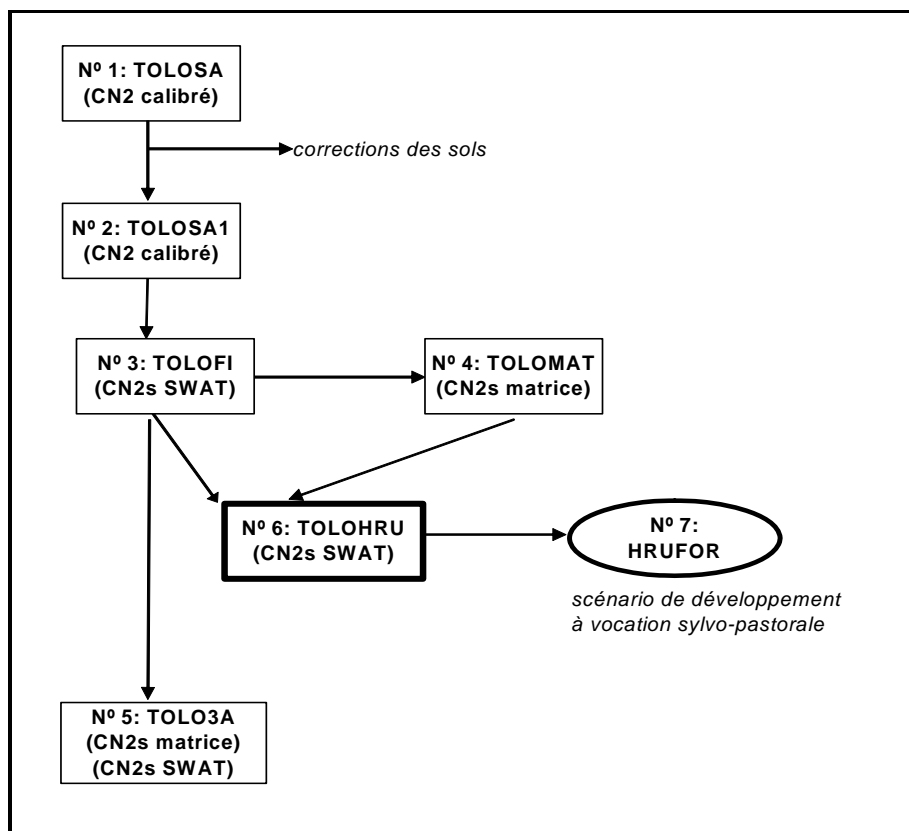


FIGURE III-8: schéma des modélisations du bilan en eau de la situation actuelle et du scénario de développement – Bassin de la Tolomosa

### III-3 ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES

L'étude de sensibilité des paramètres du modèle est basée sur la modélisation TOLOSA1, eu égard aux autres paramètres avec une division spatiale en quatre sous-bassins. Les bornes inférieures et supérieures des valeurs attribuées aux paramètres sont définies en se basant sur les données disponibles de la littérature et de terrain. La valeur optimum du paramètre est celle qui minimise l'écart moyen entre les valeurs des données de débit observées et estimées. La validité de l'ajustement est obtenue de l'analyse des variations du critère statistique EF retenu. Au total, neuf paramètres sont sélectionnés et classés selon les processus qu'ils contraignent, dont le choix est basé, rappelons-le,

sur la littérature pertinente et les recommandations du manuel SWAT (Neitsch et al., 2002). Les neuf paramètres réputés sensibles sont les suivants:

1. ESCO (facteur de compensation de l'évaporation du sol)
2. EPCO (facteur de compensation de la consommation en eau des plantes)
3. GW\_REVAP (mouvement capillaire de l'eau de l'aquifère superficiel vers les couches supérieures)
4. REVAPMN (seuil de déclenchement du mouvement ascendant REVAP à partir de l'aquifère)
5. SLSUBBSN (indice topographique de l'équation USLE)
6. GW\_DELAY (variable de retard de la recharge de l'aquifère)
7. ALPHA\_BF (coefficient de tarissement du flux de base)
8. GWQMN (seuil de déclenchement de l'écoulement de base)
9. LAT\_TTIME (temps de séjour des flux latéraux)

Parmi ces neuf paramètres retenus, cinq contrôlent le mouvement de l'eau dans le sol, entre la surface et l'aquifère superficiel et entre l'aquifère et le cours d'eau (GW\_REVAP, REVAPMN, GW\_DELAY, GW\_QMN et ALFA\_BF). En particulier, GW\_REVAP et REVAPMN contrôlent surtout le mouvement de l'eau de l'aquifère superficiel vers la zone non saturée; ALPHA\_BF et GW\_DELAY influencent la recharge de l'aquifère et le mouvement de l'eau.

Parmi les neuf paramètres, six sont représentés schématiquement par la figure III-9.

### **III-3.1 PARAMETRE ESCO**

Le paramètre ESCO (sans dimension), appelé « facteur de compensation de l'évaporation du sol », fixe la profondeur de sol qui répond par capillarité à la demande d'évaporation de la surface. Sa valeur varie entre 0,01 et 1. La sensibilité de la variable eu égard au bilan en eau est illustrée sur le graphique de la figure III-10.

Paramètres de contrôle du ruissellement et des écoulements

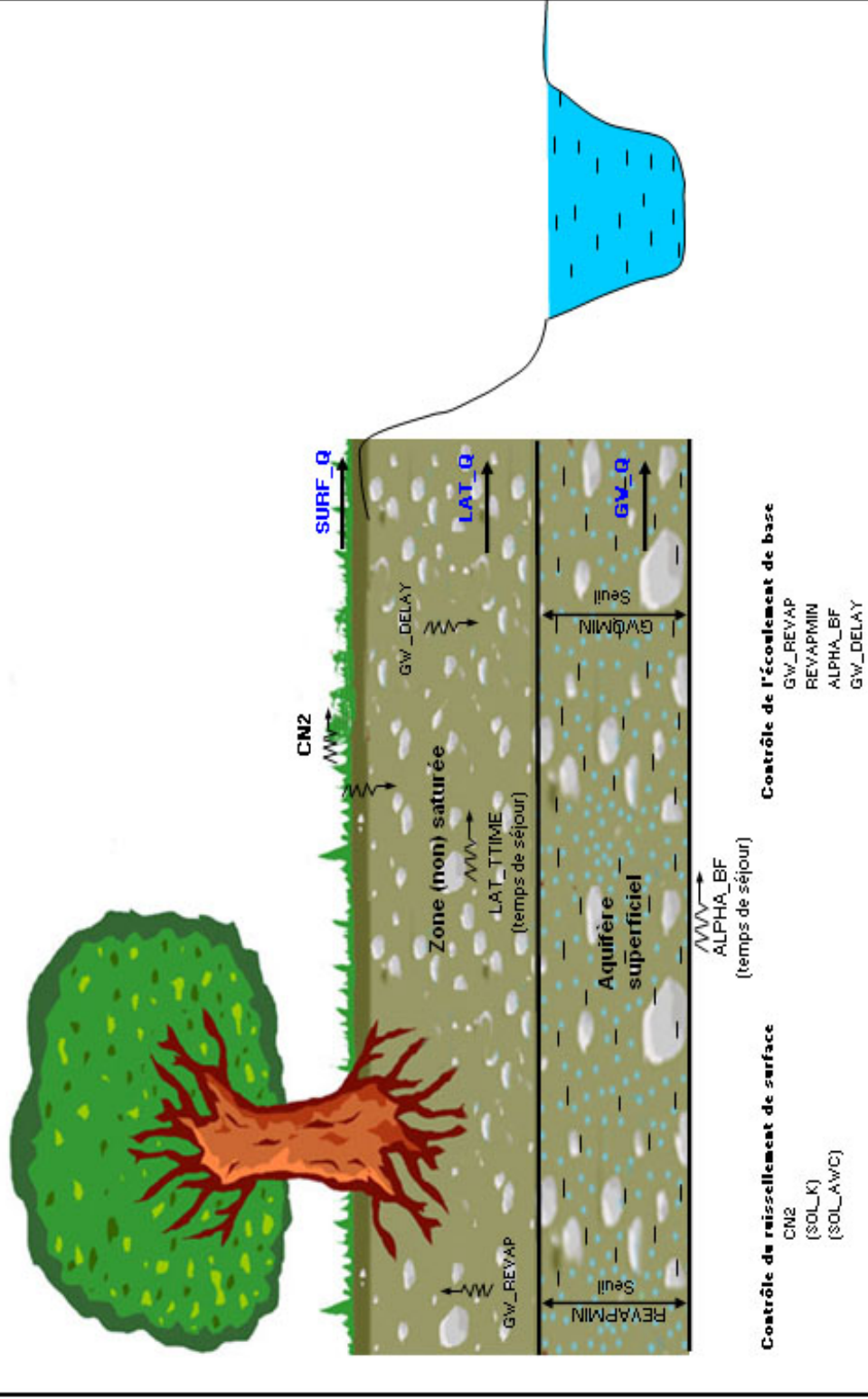
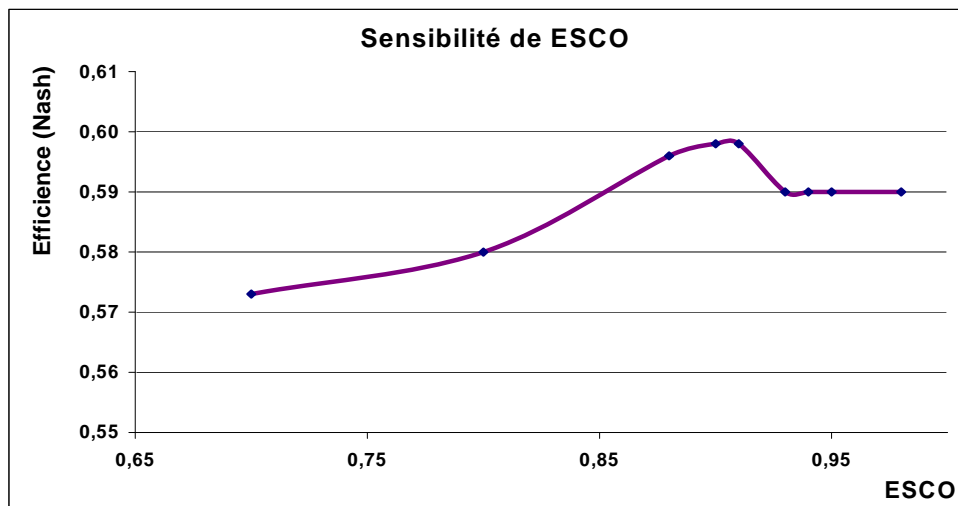


FIGURE III-9: paramètres sensibles de contrôle du ruissellement et des écoulements

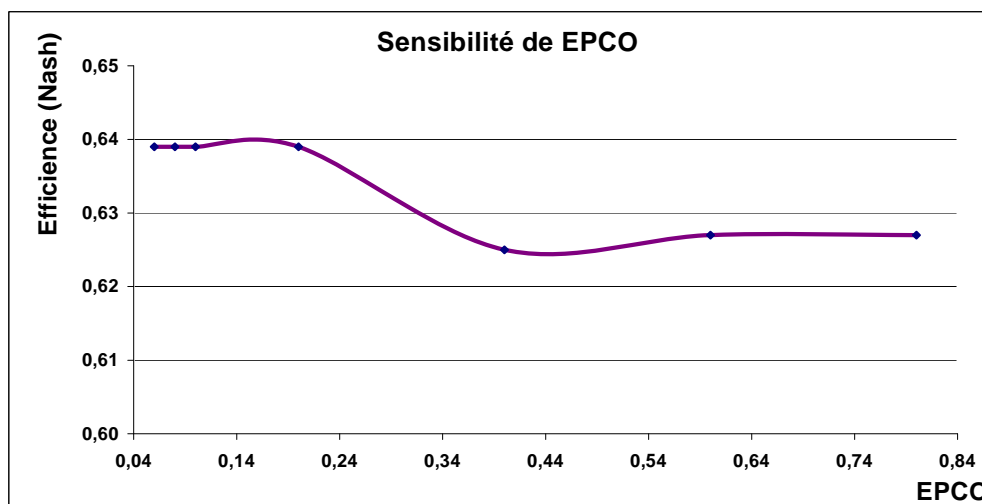


**FIGURE III-10: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation du paramètre ESCO**

On constate une tendance marquée vers une meilleure efficacité en augmentant la valeur du facteur de compensation jusqu'à 0,90. Ensuite, une chute de l'efficacité se marque une fois cette valeur dépassée pour arriver à une stabilisation de la courbe. Une valeur élevée du facteur de compensation de l'évaporation du sol ESCO empêche le modèle de rencontrer, par effet de capillarité, la demande en évaporation de la surface du sol à partir des couches plus profondes.

### III-3.2 PARAMETRE EPCO

Le paramètre EPCO (sans dimension), appelé « facteur de compensation de la consommation en eau des plantes », est fonction de la quantité d'eau nécessaire à la plante pour sa transpiration par rapport à la quantité d'eau disponible dans le sol (SW). Il varie entre 0,01 et 1. Plus on se rapproche de l'unité, plus le modèle permet de compenser la perte en eau de la plante par transpiration à partir des couches inférieures du sol. Le graphique de la figure III-11 donne la variation du paramètre en fonction de l'efficacité (Nash).



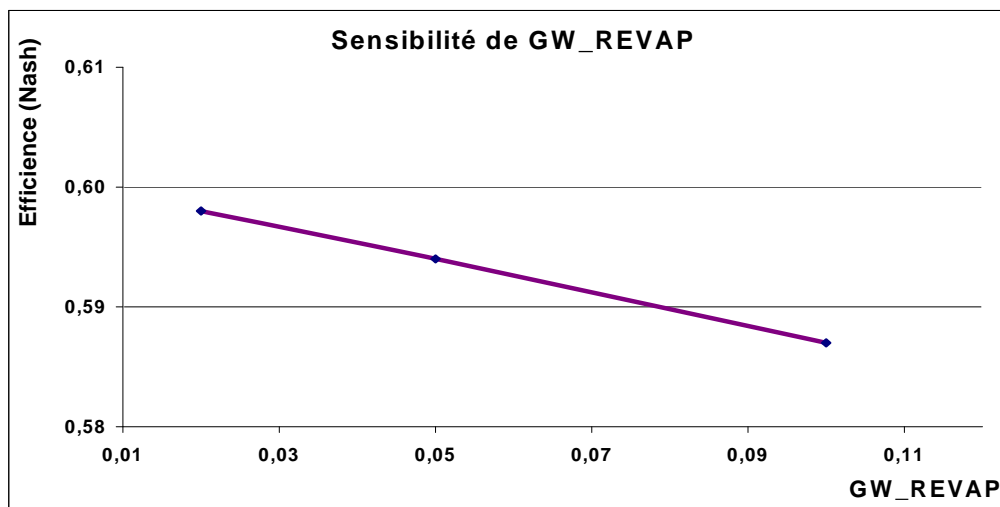
**FIGURE III-11: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation du paramètre EPCO**

On constate que la meilleure efficacité s'obtient pour une valeur du paramètre EPCO de 0,22.

### III-3.3 PARAMETRE GW\_REVAP

Le paramètre GW\_REVAP (sans dimension) est lié au mouvement capillaire de l'eau de l'aquifère superficiel vers les couches supérieures de sol non saturées et la surface du sol. Lorsque la teneur en eau de la couche superficielle diminue, l'eau dans la zone capillaire à la limite des zones saturées et non saturées subit un mouvement ascendant jusqu'à s'évaporer dans l'atmosphère. Ce processus est important dans les régions du bassin où la zone saturée est proche de la surface telle que la région de San Andres.

La valeur du paramètre est comprise entre 0,02 et 0,2. Plus elle se rapproche de 0, plus le mouvement ascendant à partir de l'aquifère superficiel est réduit. Par contre, plus elle se rapproche de 0,2, plus l'évapotranspiration est couverte par la nappe. Le graphique de la figure III-12 donne la variation du paramètre GW\_REVAP en fonction de l'efficacité (Nash).

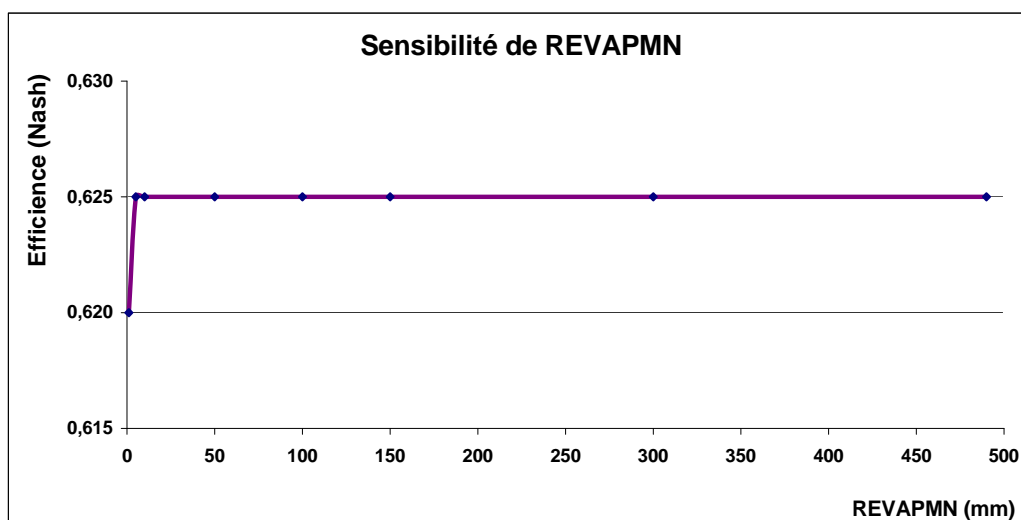


**FIGURE III-12: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation du paramètre GW\_REVAP**

On constate que la modélisation n'autorise qu'une faible remontée capillaire vers la surface du sol., ce qui est en correspondance avec les résultats ci-dessus relatifs au paramètre ESCO. Cette valeur minimum peut par exemple favoriser l'écoulement de base simulé.

### III-3.4 PARAMETRE REVAPMN

La valeur du paramètre REVAPMN fixe en mm le seuil de la hauteur d'eau de l'aquifère à partir duquel est permis le mouvement ascendant REVAP de l'eau de l'aquifère superficiel vers la zone non saturée. Elle varie de 0,1 à 500 mm. Ce mouvement de l'eau est possible seulement si la hauteur d'eau de l'aquifère superficiel est égale ou supérieure à ce seuil fixé par l'utilisateur. Le graphique de la figure III-13 donne la variation du paramètre REVAPMN en fonction de l'efficacité (Nash).



**FIGURE III-13: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en mm du paramètre REVAPMN**

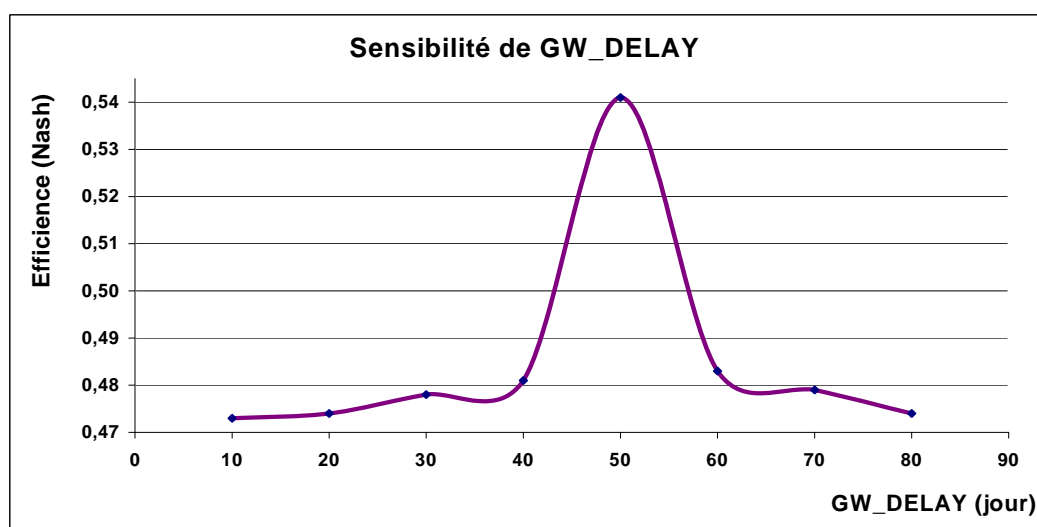
On constate que ce paramètre n'a que très peu d'influence sur la modélisation. A partir de la valeur de 5 mm, l'efficacité reste constante.

### III-3.5 PARAMETRE SLSUBBSN

Le paramètre SLSUBBSN (indice topographique de l'équation USLE) représente la distance en mètre sur laquelle le ruissellement en nappe est le processus dominant, avant sa phase de concentration (ou jusqu'au moment où un dépôt apparaît). Il est lié au rendement en sédiment et varie de 0,1 à 500 mètres. Il est cependant difficile à estimer. La modélisation est très sensible autour de la valeur de 60 mètres du paramètre, proche de la valeur par défaut recommandée par le modèle (50 mètres).

### III-3.6 PARAMETRE GW\_DELAY

Le paramètre GW\_DELAY est une variable de retard de la recharge de l'aquifère et est défini comme le temps en jours qu'il faille à l'eau pour quitter le bas de la zone radulaire et atteindre l'aquifère superficiel (délai de recharge de l'aquifère) où elle peut se transformer en écoulement de base. Le graphique de la figure III-14 donne la variation en jours du paramètre GW\_DELAY en fonction de l'efficacité (Nash).



**FIGURE III-14: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en jours du paramètre GW\_DELAY**

On constate que ce paramètre n'est sensible que dans une fourchette de valeurs assez restreinte, à savoir de 40 à 60 jours. La valeur qui permet d'allonger le signal saisonnier en donnant la meilleure efficacité est 50 jours qui correspondent au temps de percolation de l'eau vers l'aquifère superficiel.

### III-3.7 PARAMETRE ALPHA\_BF

Le paramètre ALPHA\_BF, appelé « coefficient de tarissement ou de récession du flux de base », est lié au délai (mesuré en jours) relatif aux eaux souterraines rejoignant le cours d'eau. Il représente la réponse du flux souterrain en terme de débit de base ou le temps en jours de la courbe de récession du flux de base. Sa valeur varie de 0,1 à 0,3 jour pour une réponse rapide et de 0,9 à 1 jour pour une réponse lente. La sensibilité du facteur est illustrée par le graphique de la figure III-15.

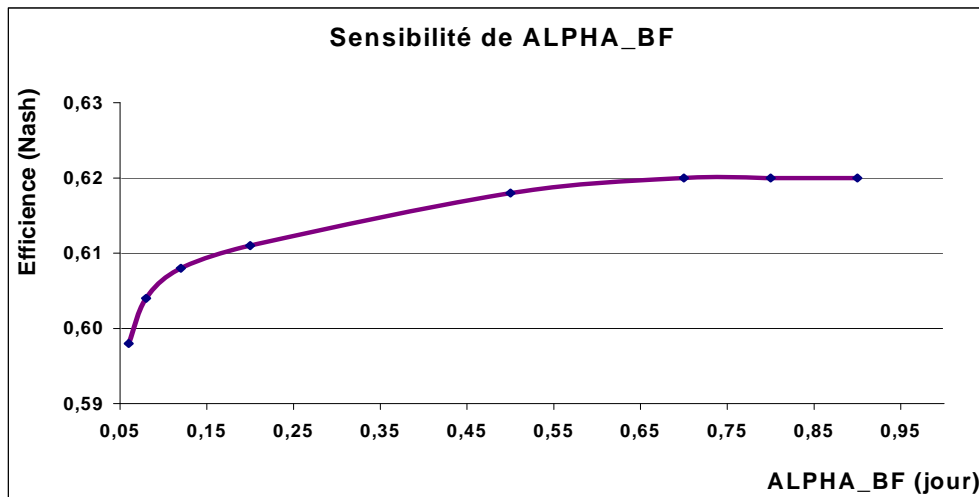
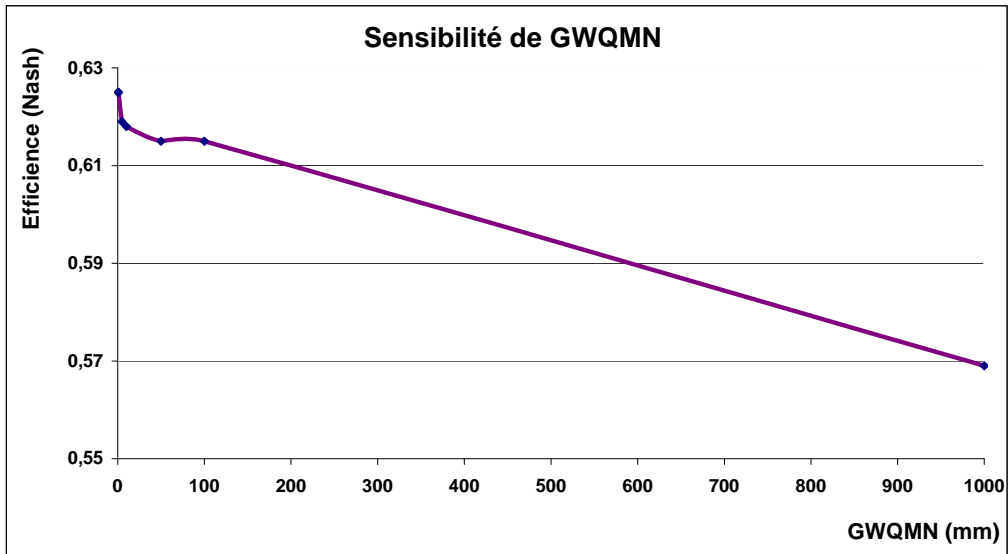


FIGURE III-15: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en jours du paramètre ALPHA\_BF

L'analyse de sensibilité a fait varier ALPHA\_BF de 0,05 à 0,90 jour. On constate que l'augmentation de la valeur du coefficient de tarissement va de pair avec une augmentation assez régulière de l'efficacité du modèle pour atteindre un plateau à partir de la valeur de 0,75 jour.

### III-3.8 PARAMETRE GWQMN

Le paramètre GWQMN fixe le seuil de la hauteur de l'eau dans l'aquifère superficiel requis pour déclencher l'écoulement de base. Cet écoulement n'est possible que si la hauteur de l'eau de la nappe superficielle est égale ou supérieure à ce seuil fixé par l'utilisateur. Cette hauteur peut varier de 0,0 à 5.000 mm. Le graphique de la figure III-16 donne la variation du paramètre en fonction de l'efficacité (Nash).

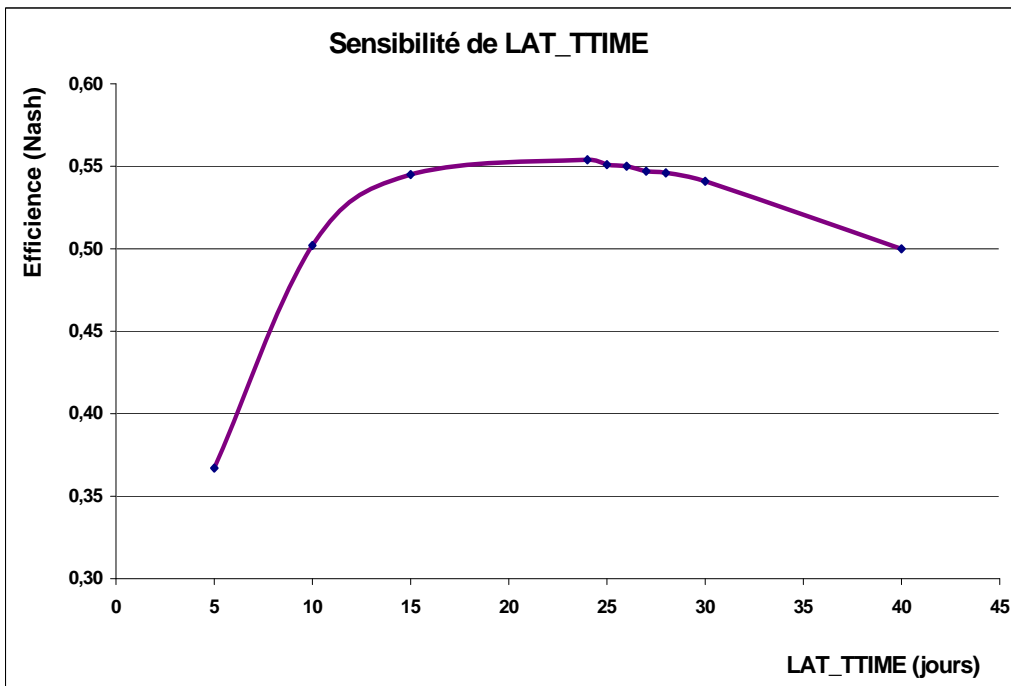


**FIGURE III-16: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en mm du paramètre GWQMN**

On constate que la meilleure efficacité s'obtient pour une valeur de GWQMN proche de 0 mm (0,5 mm). Une valeur faible de ce paramètre favoriserait l'écoulement de base.

### III-3.9 PARAMETRE LAT\_TTIME

La sensibilité du paramètre LAT\_TTIME, qui représente le temps de séjour en jours des flux hypodermiques latéraux, est montrée par le graphique de la figure III-17.



**FIGURE III-17: écart de l'ajustement entre les débits observés et simulés pour une variation en jours du paramètre LAT\_TTIME**

La sensibilité de la modélisation par rapport au paramètre LAT\_TTIME est la plus importante pour des valeurs faibles du paramètre et le modèle réagit le mieux avec une valeur de LAT\_TTIME de 24 jours.

### III-3.10 CONCLUSIONS

Le tableau III-4 résume les résultats de l'étude de sensibilité des paramètres (facteurs et seuils) du modèle SWAT.

**TABLEAU III-4: résultats de l'étude de sensibilité des paramètres via le modèle TOLOSA1**

Paramètres	Unité	Fichier SWAT	Fourchette des valeurs	Fourchette des EF
ESCO	--	.hru	0,70–0,95	0,575–0,598
EPCO	----	.hru	0,04–0,83	0,625–0,639
GW_REVAP	--	.gw	0,02–0,096	0,586–0,598
REVAPMN	mm	.gw	1-500	0,620–0,625
SLSUBBS	m	.hru	50-90	
GW_DELAY	Jour	.gw	10-80	0,467–0,535
ALPHA_BF	Jour	.gw	0,06–0,90	0,598–0,620
GWQMN	mm	.gw	0,01–1.000	0,569–0,625
LAT_TTIME	Jour	.hru	5-35	0,356–0,551

Des neuf paramètres analysés, seul REVAPMN ne montre pas d'effet significatif sur la simulation journalière du débit à l'exutoire. Par contre, les deux paramètres qui ont la plus grande incidence sur le débit sont LAT-TTIME et GW-DELAY.

L'analyse de sensibilité du paramètre GW\_REVAP indique que l'eau remonte avec difficulté par les forces de capillarité vers la surface du sol. La valeur très faible du seuil REVAPMN (20 mm) confirme le phénomène, ce qui signifie qu'il n'y a pratiquement pas de mouvement vertical de l'aquifère vers la surface du sol, soit que la modélisation considère un sol peu perméable (conductivité hydraulique très faible), soit que l'aquifère est trop profond.

La valeur élevée du facteur de compensation de l'évaporation du sol ESCO empêche de satisfaire par effet de capillarité la demande en évaporation de la surface du sol à partir de couches plus profondes du sol, ce qui confirme qu'il y a peu de mouvement vertical de l'aquifère vers la surface du sol.

L'analyse de sensibilité du paramètre de temps de séjour LAT\_TTIME montre que le modèle réagit le mieux avec une valeur de LAT\_TTIME de 24 jours et cela, aux dépens des débits de pointe qui seraient alors moins bien marqués dans l'hydrogramme des débits simulés.

### III-4 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLOFI

On appelle TOLOFI la première modélisation complète qui s'attache à décrire la situation « actuelle » du bilan en eau du bassin versant. Cette modélisation considère le paramètre CN comme une variable basée physiquement et, donc, qui n'est pas l'objet d'un calibrage particulier.

#### III-4.1 DISCRETISATION TEMPORELLE

Pour les besoins de la modélisation, la période d'observations débitométriques disponibles de 1976 à 1984 est divisée en trois étapes ainsi que le montre le tableau III-5.

**TABLEAU III-5: étapes chronologiques de la modélisation - Bassin de la Tolomosa**

Années d'observations (par année hydrologique) et étapes							
76–77	77–78	78–79	79–80	80–81	81–82	82–83	83–84
Mise en régime du modèle	Calibrage du 01/08/77 au 31/07/81				Validation du 01/08/81 au 31/07/84		

La validation des résultats du bilan en eau est comprise comme une restitution correcte des performances sur une autre période avec tous les paramètres calibrés.

#### III-4.2 DISCRETISATION SPATIALE

La modélisation du bilan en eau TOLOFI utilise une discrétisation spatiale en quatre HRU dominantes qui correspondent aux quatre sous-bassins préalablement déterminés par le MNT. En effet, chaque sous-bassin est considéré ici comme une entité homogène et donc forme une HRU.

Les caractéristiques de chaque HRU ou de chaque sous-bassin sont définies en considérant l'unité dominante de sol et de la classe d'occupation des terres (approche dominante).

Le tableau III-6 présente les quatre HRU ou sous-bassins avec leurs combinaisons respectives sol-couverture végétale.

**TABLEAU III-6: caractéristiques des Unités de Réponse Hydrologique (HRU) dominantes de la modélisation TOLOFI – Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin ou HRU	Superficie (ha)	Caractéristiques dominantes		Superficie HRU	
		Sol	Couverture végétale	(ha)	(% du bassin)
Bassin	41.904				
TolmosaA	13.003	WPAS	LEDB(2)	13.003	31
Mena	6.416	WPAS	LEDB	6.416	15
Sola	14.301	PAST	IGFA	14.301	34
Pinos	8.182	PAST	LEDB(2)	8.182	19

### III-4.3 PHASE DE CALIBRAGE

#### III-4.3.1 VALEUR DES PARAMETRES

La phase de calibrage a, rappelons-le, pour but de rapprocher les débits saisonniers et annuels simulés des valeurs observées, en se basant sur les valeurs obtenues à partir des critères statistiques choisis précédemment (confer point II-3.5).

Ainsi que précisé précédemment (confer point II-3.4), les paramètres analysés durant la phase de calibrage sont répartis en trois groupes. Le premier groupe contient les variables, dont la valeur fournie par le modèle est modifiée sur base d'identifications indépendantes (base de données préparée antérieurement, suggestions et recommandations du manuel SWAT, littérature scientifique, etc.). Les valeurs des variables du second groupe sont obtenues durant la phase de calibrage. Enfin, les paramètres du troisième groupe sont ceux pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou dont les effets sont peu compris. Ils sont estimés en prenant les valeurs par défaut suggérées par le modèle. La phase de calibrage se limite alors pratiquement aux neuf paramètres préalablement sélectionnés par l'analyse de sensibilité (confer point III-3).

La valeur du  $CN_2$  utilisée pour le calcul du ruissellement direct dans chaque sous-bassin est celle calculée par le modèle et modifiée par nos soins en  $CN_{2s}$  pour tenir compte de la pente moyenne du sous-bassin considéré (confer point II-2.4.2.1). Rappelons une fois de plus que le CN ne fait pas l'objet d'un calibrage ultérieur.

En relation avec l'érosion et les pratiques agricoles du bassin, la valeur du paramètre USLE\_C est celle par défaut correspondant à une utilisation des terres de type AGRC<sup>1</sup> (*agricultural land close grown*). Pour l'occupation des terres de type AGRC, toutes les valeurs prises sont celles par défaut. Aucun apport d'engrais n'est considéré. Enfin, pour le rendement en sédiment du bassin versant, seule la variable SLSUBBSN a été calibrée.

Les valeurs finales des vingt-cinq paramètres issus soit du calibrage, soit des informations de terrain ou, enfin, des valeurs par défaut du modèle sont reprises dans le tableau III-7. L'ensemble des données récoltées et introduites dans le logiciel est stocké dans le fichier *subbasin input file* de l'interface AvSWAT.

<sup>1</sup> USLE\_C est compris entre 0,001 et 0,5 pour AGRC

**TABLEAU III-7: valeurs finales des paramètres de la modélisation TOLOFI obtenues par calibrage (1), des données de terrain, littérature, etc. (2) ou à partir des valeurs par défaut (3) du modèle (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa**

Fichier	Paramètre	Unité	Valeur (*)	Valeur finale			
				Tolomosa	Mena	Sola	Pinos
<b>Paramètres liés aux processus de l'évapotranspiration</b>							
.hru	ESCO (1)	--	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90
.hru	EPCO (1)	--	1,0	0,06	0,06	0,06	0,06
.hru	CANMX (2)	mm	0,0	2	2	2	2
.gw	GW_REVAP (1)	--	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
.gw	REVAPMN (1)	mm	1,0	20	20	20	20
<b>Paramètres liés au processus des écoulements</b>							
.mgt	CN <sub>2s</sub> SWAT (2)	--	74	73	73	74	74
.mgt	USLE_P (3)	--	1,0	1	1	0,9	1
Crop.dat	USLE_C (3)	--	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
.hru	OV_N (3)	--	0,15	0,15	0,15	0,25	0,25
.hru	SLSUBBSN (1)	m	50	60	60	60	60
.hru	SLOPE (2)	m/m	0,10	0,18	0,16	0,41	0,25
<b>Paramètres liés aux processus de transfert des écoulements</b>							
.sub	CH_K1 (3)	mm/h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
.sub	CH_N1 (2)	--	0,014	0,04	0,04	0,04	0,04
.rte	CH_N2 (2)	--	0,014	0,035	0,03	0,05	0,03
.rte	CH_K2 (2)	mm/h	0,5	35	12	12	12
.rte	CH_EROD	--	0	0	0	0	0
<b>Paramètres liés aux processus de l'eau dans le sol</b>							
.sol	SOL_AWC (2)	mm H <sub>2</sub> O /mm sol	0,12	0,35 0,29 0,29	0,18 0,18	0,35 0,29 0,29	0,35 0,29 0,29
.sol	SOL_K (2)	mm/h	11	30 70 30	30 130	30 50 30	30 70 30
.sol	USLE_K (1)	--	0,25	0,6	0,6	0,4	0,4
.gw	GW_DELAY (1)	Jour	31	50	50	50	50
.gw	ALPHA_BF (1)	Jour	0,048	0,7	0,7	0,7	0,7
.gw	GWQMN (1)	mm	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5
.gw	RCHRG_DP (3)	--	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
.gw	SHALLST (1)	mm	0,5	20	20	20	20
.hru	LAT_TTIME (1)	Jour	0	24	24	24	24

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) Valeur obtenue par calibrage

(2) Valeur obtenue à partir des données de terrain, littérature, etc.

(3) Valeur par défaut

(\*) Initiales lors du calibrage ou par défaut

A la lecture du tableau, on constate des valeurs finales identiques dans les sous-bassins pour un certain nombre de paramètres ajustés. En effet, les données disponibles pour le calibrage ne sont pas toujours suffisamment précises pour marquer une différence entre les sous-bassins. Par exemple, la différence entre les couvertures végétales dominantes par sous-bassin (WPAS et PAST) ne provoque pas une variation suffisante des coefficients qui puisse altérer significativement la variable de sortie.

### III-4.3.2 CRITERES STATISTIQUES

#### III-4.3.2.1 Coefficients d'efficience et de détermination et écart-type

Les valeurs des trois critères statistiques utilisés pour évaluer la performance de la modélisation TOLOFI pour la phase de calibrage (pas de temps journalier) sont données dans le tableau III-8.

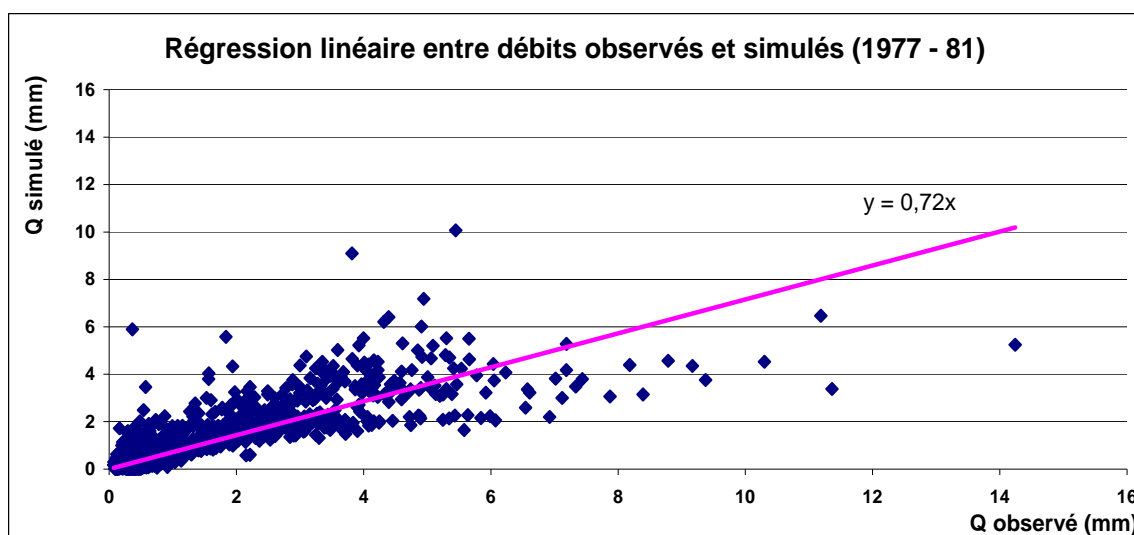
**TABLEAU III-8: valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOFI calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa**

Critère statistique	Valeur
EF (efficacité de Nash et Sutcliffe)	0,64
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,67
Ecart-type résiduel	6,7 m <sup>3</sup> /s

Les valeurs du coefficient d'efficacité EF (0,64) et du coefficient de détermination (0,67) permettent de considérer, pour les conditions locales, la modélisation comme apte à représenter le comportement hydrologique du bassin versant de la Tolomosa (Gassman et al., 2007; Motovilov et al., 1999 cités par Watson et al., 2005). L'écart-type résiduel est de 6,7 m<sup>3</sup>/s.

#### III-4.3.2.2 Régression des moindres carrés

Les résultats de la calibration des débits journaliers sont présentés sous forme de régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs en mm des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes sur le graphique de la figure III-18.



**FIGURE III-18: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolofi}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 (run 6KUL2) - Bassin de la Tolomosa**

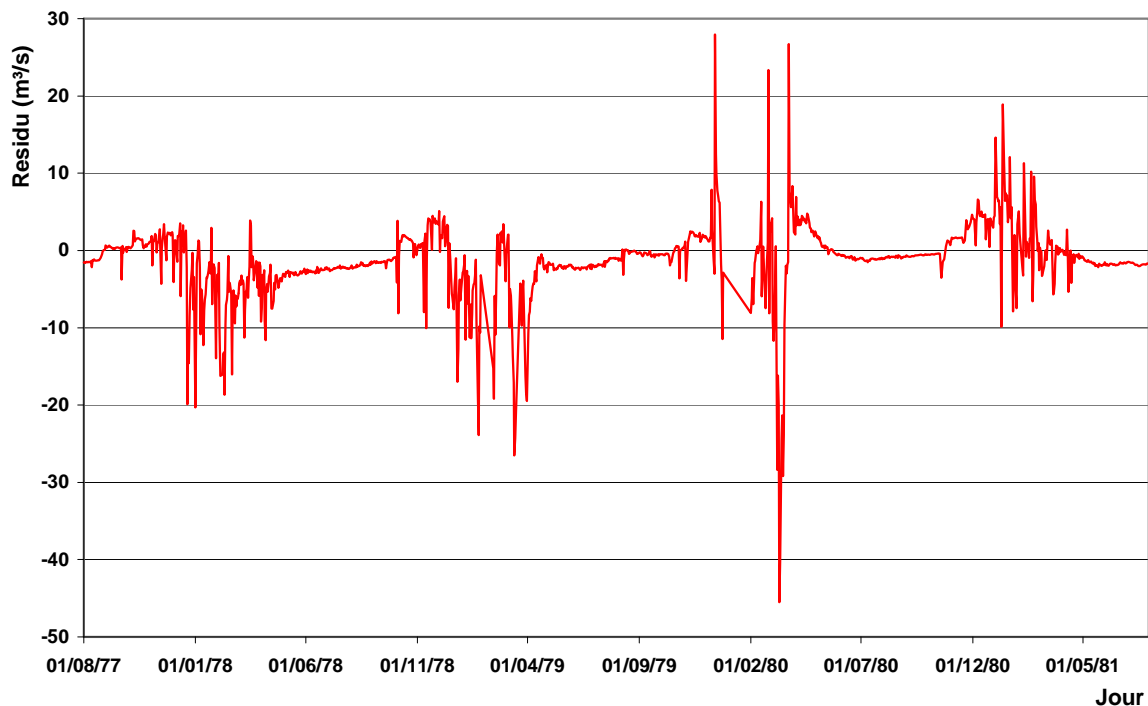
Le coefficient de régression a une valeur de 0,72. La régression entre les valeurs des débits journaliers simulés et observés aux dates correspondantes pour la phase de calibrage indique une corrélation acceptable. La comparaison des écoulements observés et simulés montre une faible dispersion pour les petits débits.

Le coefficient angulaire (ou pente) de la droite de régression est égal au coefficient de régression. Il peut être exprimé par un pourcentage et quantifie la variation de l'ordonnée lorsque l'abscisse augmente d'une unité. Cette valeur du coefficient angulaire de la droite de régression indique une sous-estimation des débits simulés par rapport aux débits observés.

Nous pouvons aussi remarquer la différence d'ordre de grandeur entre les données simulées et mesurées. Outre quelques points fortement erratiques aux débits faibles, on observe que la sous-estimation des débits simulés par rapport aux débits observés est accentuée pour les débits élevés qui tendent vers un palier. Les observations supérieures à 9 mm correspondent pour la plupart aux pointes de débit observées entre les 8 et 17 mars 1980 (confer annexe II-1).

#### III-4.3.2.3 Evolution des résidus

L'évolution de la différence entre les débits observés  $Q_{obs}$  et simulés  $Q_{tolofi}$  (résidus) est donnée sur le graphique de la figure III-19. Soulignons que, pour éviter que les écarts positifs et négatifs se compensent, on utilise le carré du résidu.



**FIGURE III-19: résidus en m<sup>3</sup>/s pour la phase et période de calibrage de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa**

L'examen du graphique montre que, de manière générale, les résidus sont les plus importants durant la période pluvieuse du mois de décembre au mois d'avril. L'écart-type résiduel de 6,7 m<sup>3</sup>/s multiplié par deux donne l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des résidus.

#### III-4.3.3 RESULTATS DE LA PHASE DE CALIBRAGE

Les valeurs des termes du bilan en eau de la phase de calibrage de la modélisation TOLOFI sont extraites des tableaux des fichiers TXTINOUT (output STD) et WATOUT. Comme chaque sous-bassin correspond à une HRU dans la modélisation TOLOFI, les résultats par HRU sont les mêmes que ceux obtenus par sous-bassin.

L'écoulement total WYLD (*water yield*), qui est la quantité totale d'eau quittant par unité de calcul du bassin considéré sur une période donnée, est la somme des termes:

$$WYLD = SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q - TLOSS$$

avec:

WYLD: écoulement total (mm H<sub>2</sub>O)

SURF\_Q: ruissellement de surface<sup>1</sup> (mm H<sub>2</sub>O)

LAT\_Q: écoulement hypodermique (mm H<sub>2</sub>O)

GW\_Q: écoulement de base (mm H<sub>2</sub>O)

TLOSS: perte moyenne journalière à travers le lit du chenal (mm H<sub>2</sub>O)

Le tableau III-9 présente, globalement pour le bassin versant, les valeurs respectives des écoulements annuels par année hydrologique simulés pour le bassin versant.

<sup>1</sup> Surface runoff

**TABLEAU III-9: résultats du calibrage de la simulation TOLOFI des écoulements annuels globaux par année hydrologique pour la période 1977–81 (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)
77-78	1.120	767	3	314	317	32	32
78-79	1.464	938	9	457	465	46	47
79-80	1.497	907	35	476	511	82	84
80-81	1.239	761	19	427	446	40	38
<b>Moyenne annuelle</b>	<b>1.331</b>	<b>843</b>	<b>17</b>	<b>418</b>	<b>435</b>	<b>50</b>	<b>50</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

Le tableau III-10 présente, globalement pour le bassin versant, les résultats du calibrage de la simulation des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1981 de la modélisation TOLOFI.

**TABLEAU III-10: résultats du calibrage de la simulation TOLOFI des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1981 (SWAT run 6 KUL partie 2) – Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)
Août	20	14	0	3	3	1	0
Septembre	13	14	0	4	4	0	0
Octobre	66	42	1	11	11	0	1
Novembre	162	81	0	24	24	2	4
Décembre	230	123	3	46	49	4	9
Janvier	279	150	4	76	80	7	14
Février	252	147	5	94	99	10	13
Mars	225	154	4	85	88	11	8
Avril	72	73	0	51	52	8	1
Mai	6	24	0	19	19	4	0
Juin	2	9	0	5	5	2	0
Juillet	5	8	0	2	2	1	0
<b>TOTAL</b>	<b>1.331</b>	<b>838</b>	<b>17</b>	<b>418</b>	<b>435</b>	<b>50</b>	<b>50</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

#### III-4.3.4 EVALUATION DES PERFORMANCES DU CALIBRAGE

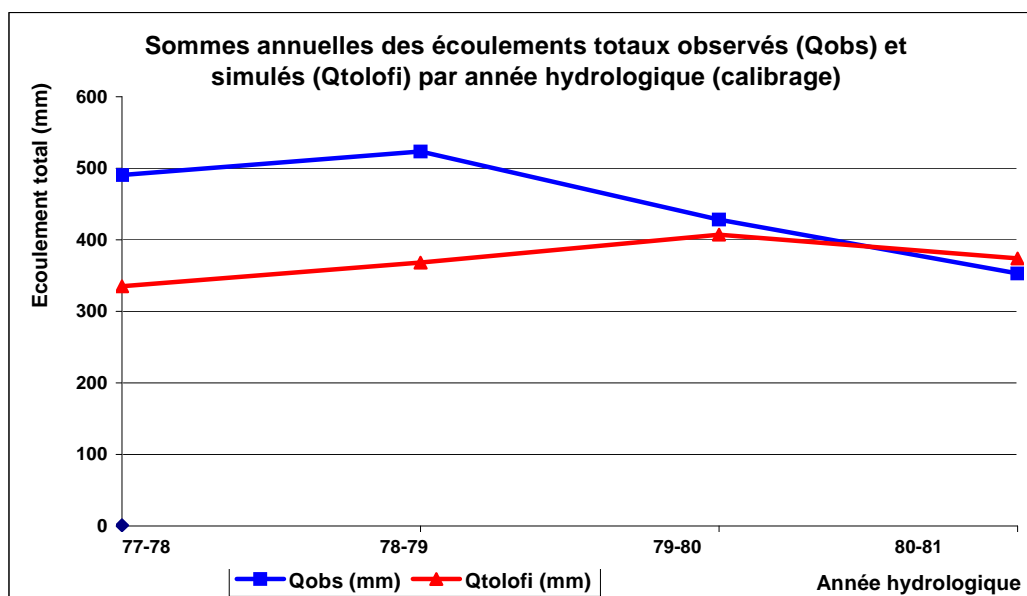
L'analyse porte sur la comparaison entre les résultats de la simulation et les données observées disponibles. Rappelons que les observations journalières ne sont pas continues. Comme la comparaison des bilans ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observation, les sommes suivantes correspondent alors à la somme annuelle ou mensuelle jour à jour, uniquement lorsqu'une donnée observée correspond à une donnée simulée.

##### III-4.3.4.1 Sommes annuelles des écoulements totaux

La comparaison des sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) par SWAT est illustrée par année hydrologique (77-78; 78-79; 79-80; 80-81) dans le tableau III-11 et sur le graphique de la figure III-20. Comme précitée, l'année 76-77 de mise en régime pour la simulation n'est pas reprise ici.

**TABLEAU III-11: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes de la simulation TOLOFI par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Q observé (mm)	Q tolofi (mm)
1977-78	490	335
1978-79	523	368
1979-80	428	407
1980-81	353	374



**FIGURE III-20: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa**

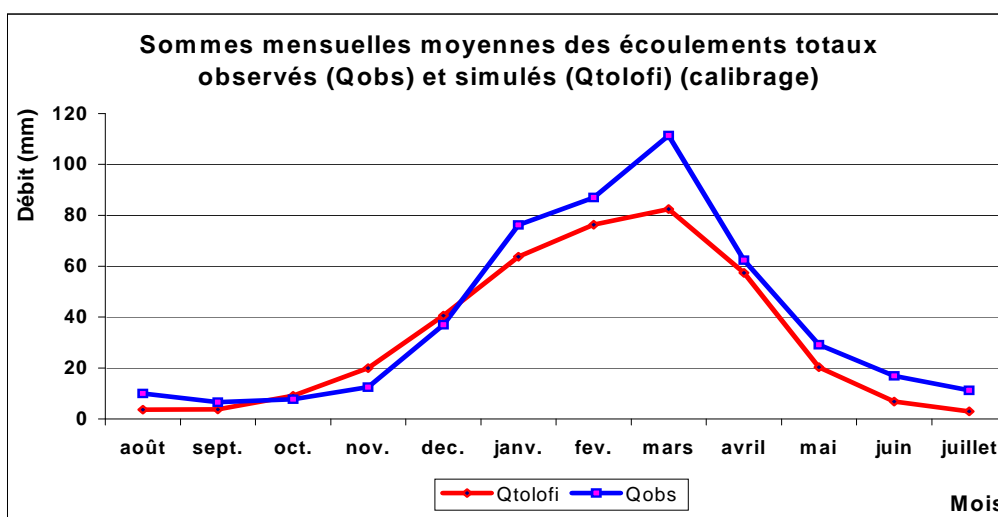
On constate que la phase de calibrage sous-estime les écoulements simulés par rapport aux écoulements observés pour les deux premières années hydrologiques (1977–78 et 1978–79) et, dans une moindre mesure, pour l'année hydrologique 1979-80.

#### **III-4.3.4.2 Sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux**

La comparaison des sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) par SWAT aux dates correspondantes est donnée pour la phase de calibrage par année hydrologique (77-78 à 80-81) dans le tableau III-12 et sur le graphique de la figure III-21. Comme précitée, l'année de mise en régime n'est pas reprise ici.

**TABLEAU III-12: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa**

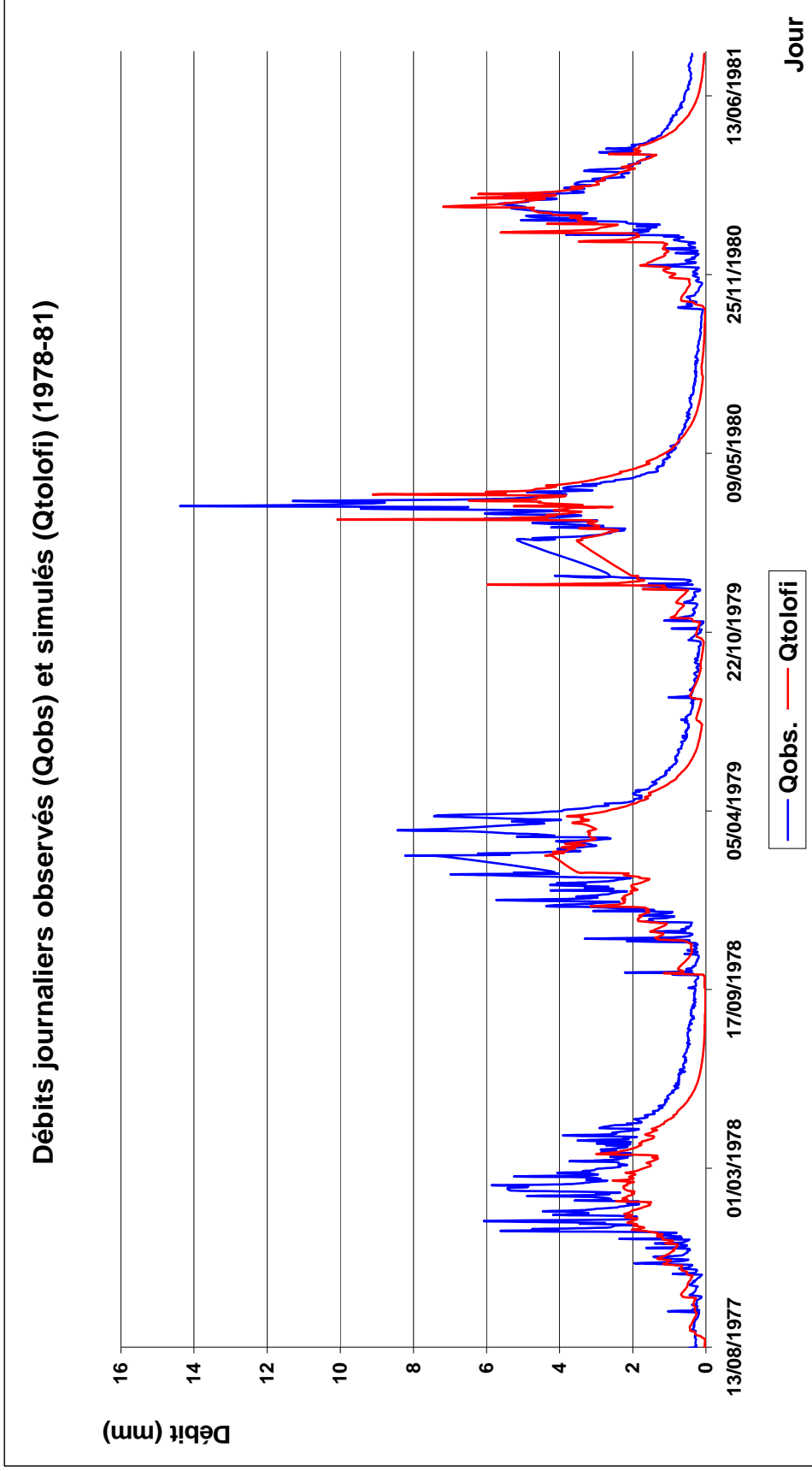
Mois	Q observé (mm)	Q tolofi (mm)
Août	10	4
Septembre	7	4
Octobre	8	9
Novembre	12	20
Décembre	37	41
Janvier	76	64
Février	87	76
Mars	111	82
Avril	62	57
Mai	29	20
Juin	17	7
Juillet	11	3
<b>TOTAL</b>	<b>468</b>	<b>387</b>



**FIGURE III-21: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa**

#### **III-4.3.4.3 Ecoulements journaliers**

L'évolution des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) est comparée aux dates correspondantes pour la phase et période de calibrage (1977-81) sur le graphique de la figure III-22. Comme les données observées ne sont pas complètes, les données reportées de simulation sont uniquement celles qui correspondent à une donnée observée.

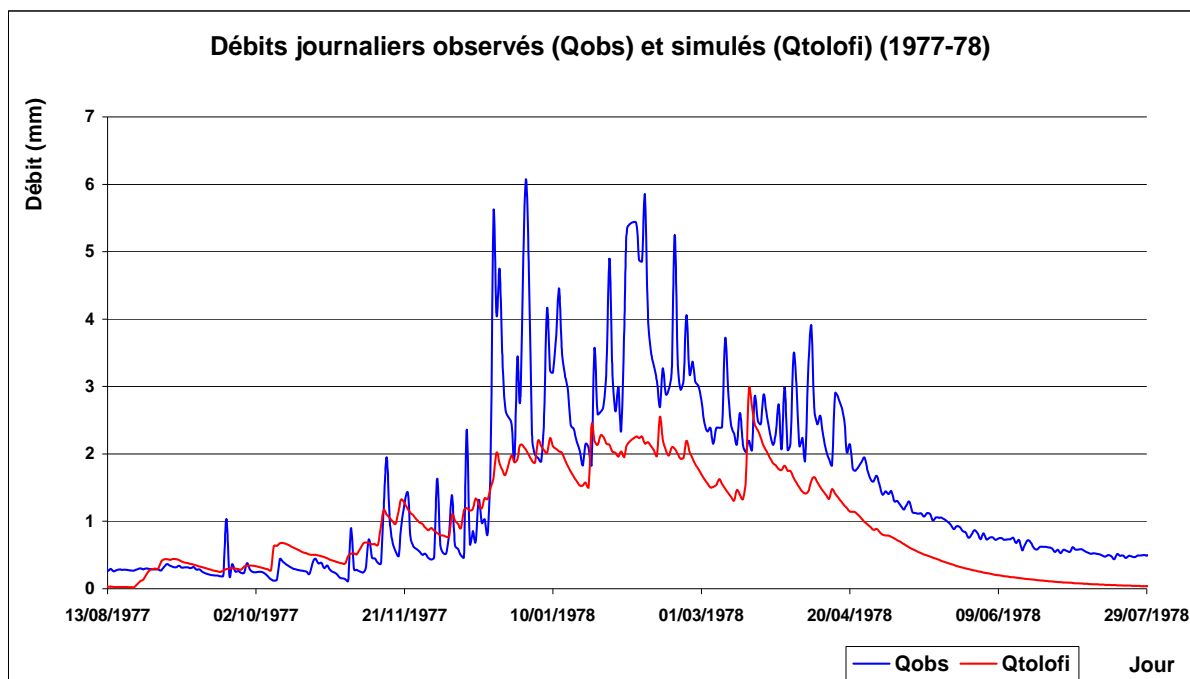


**FIGURE III-22:** évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1981. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa

Par l'observation des hydrogrammes, nous constatons que l'allure générale de l'hydrogramme saisonnier simulé est semblable à celle de l'hydrogramme observé et montre un respect général des fluctuations saisonnières, malgré une différence d'ordre de grandeur entre les simulations et les mesures.

Durant l'époque d'étiage, lorsque l'écoulement de base est prédominant, les débits obtenus de la simulation montrent une bonne concordance avec les débits observés, bien que la courbe de récession simulée soit plus rapide que celle observée.

La figure III-23 reprend les hydrogrammes des débits observés et simulés sur la première année de la phase de calibrage.



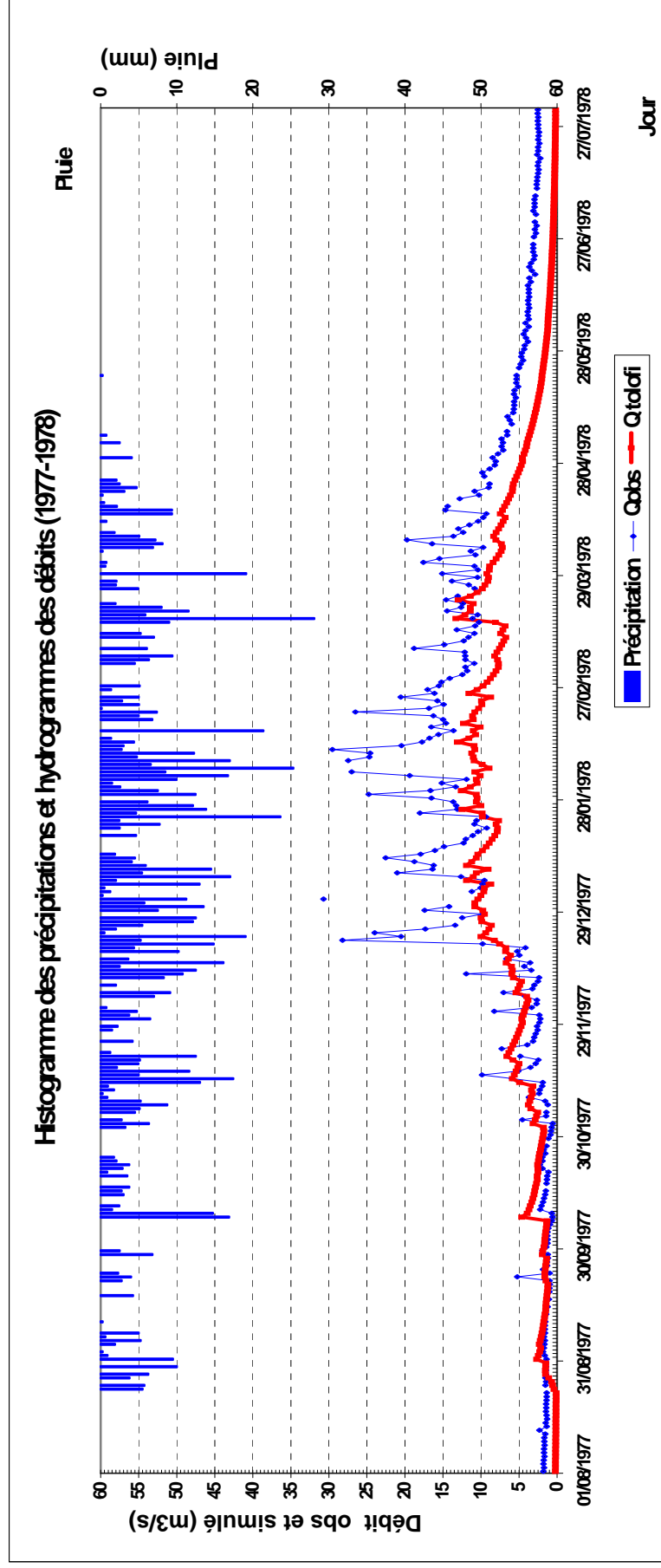
**FIGURE III-23: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa**

Grâce au graphique de la figure III-23, nous pouvons mieux remarquer la différence d'ordre de grandeur entre les débits simulés et mesurés, tout en ayant une similitude dynamique du fonctionnement hydrologique. On constate aussi que les crues sont assez mal restituées avec une correspondance assez pauvre entre les pics observés et simulés pour cette première année. Comme nous l'avons discuté antérieurement, les mesures de débits appellent à une certaine vigilance.

#### **III-4.3.4.4 Histogramme des précipitations et hydrogrammes des écoulements**

Les figures III-24 à III-27 comparent, par année hydrologique, les débits journaliers historiques disponibles ( $Q_{obs}$ ) et l'ensemble des débits simulés<sup>1</sup> ( $Q_{tolofi}$ ) par le modèle en regard des valeurs journalières des précipitations correspondantes.

<sup>1</sup> Les données simulées proviennent du fichier WATOUT non épuré



**FIGURE III-24:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1978

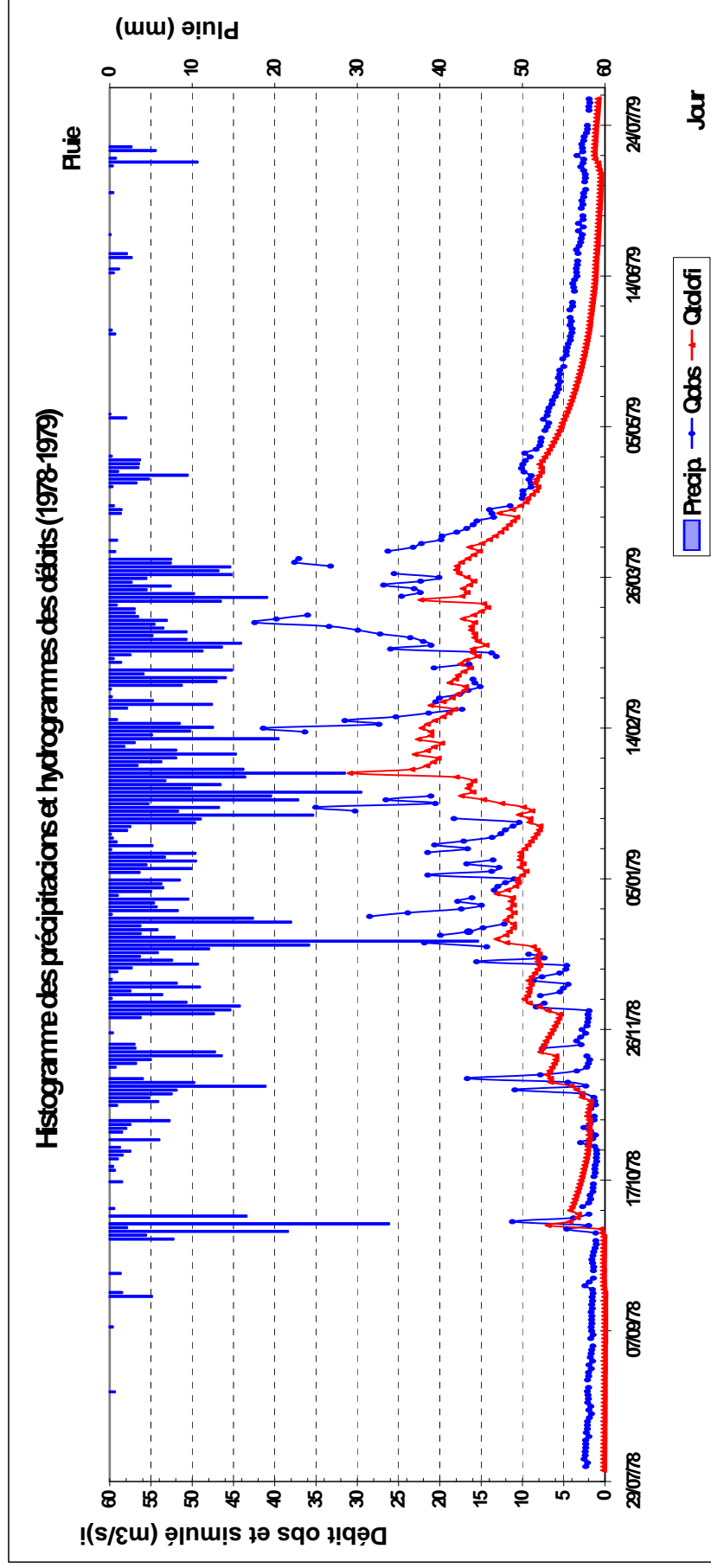


FIGURE III-25: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolof}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1978 à 1979

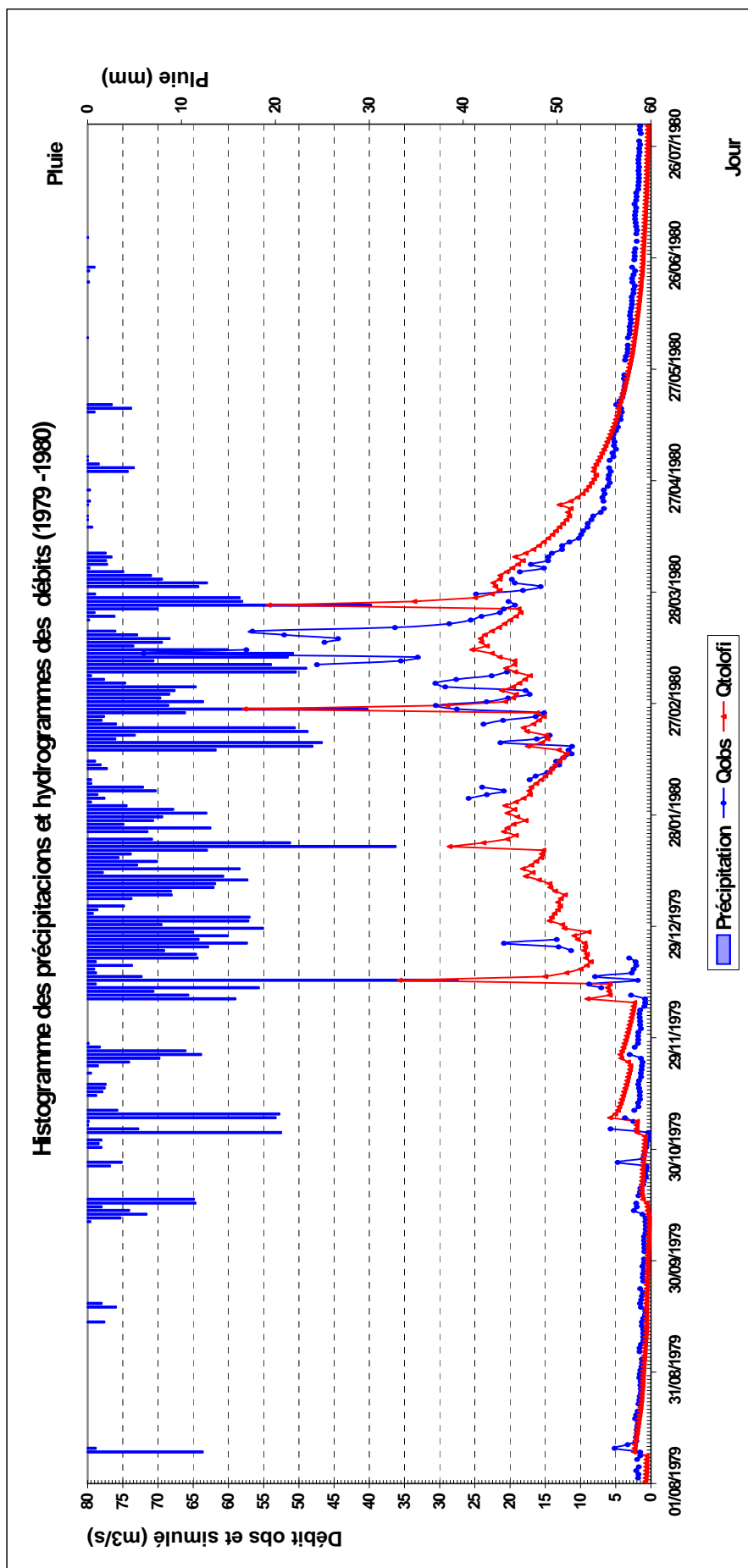


FIGURE III-26: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1979 à 1980

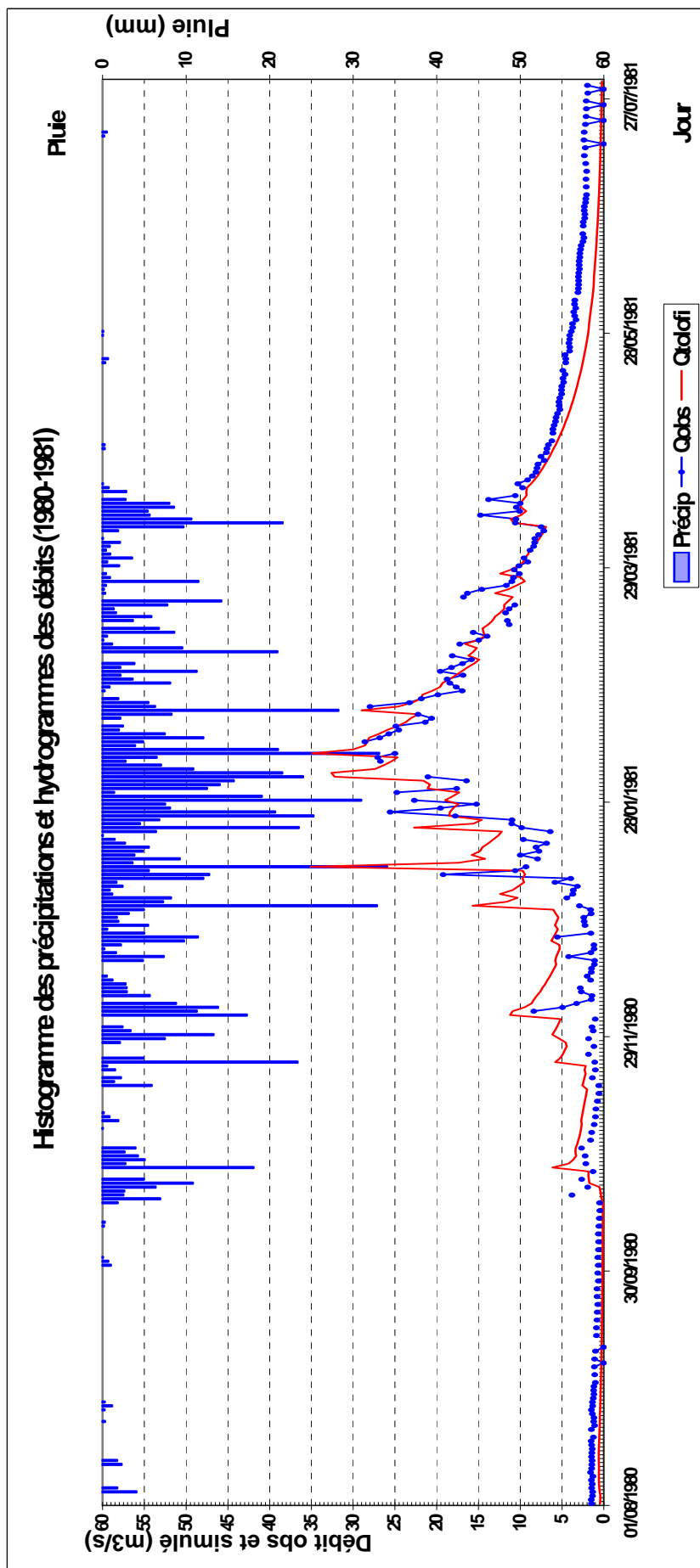


FIGURE III-27: hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et débits simulés ( $Q_{sim}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1980 à 1981

La comparaison annuelle entre l'histogramme des précipitations et les hydrogrammes des écoulements observés et simulés indique le respect général de la fluctuation saisonnière, surtout à partir de l'année hydrologique 1978–79. Une corrélation visuelle existe entre pics de précipitations et pics de débits. Cependant, l'amplitude des pics de débits est moins marquée que celle des précipitations. Enfin, on constate que, pour les mêmes dates, il n'existe pas toujours une donnée observée (confer annexe II-1).

### III-4.4 PHASE DE VALIDATION

#### III-4.4.1 CRITERES STATISTIQUES

##### III-4.4.1.1 Coefficients d'efficience et de détermination et écart-type

Les valeurs des trois critères statistiques utilisés pour évaluer la performance de la modélisation TOLOFI pour la phase de validation sont données dans le tableau III-13 (pas de temps journalier).

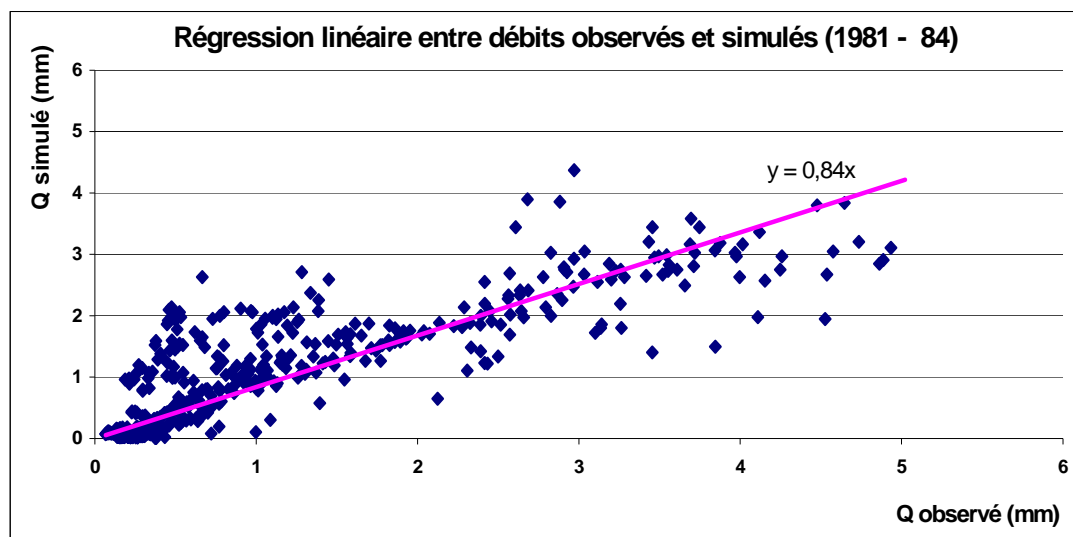
**TABLEAU III-13: valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOFI calculées pour la phase de validation sur la période d'août 81 à juillet 84 (run 5) - Bassin de la Tolomosa**

Critère statistique	Valeur
EF (efficience de Nash et Sutcliffe)	0,67
$R^2$ (coefficient de détermination)	0,74
Ecart-type résiduel	5,2 m <sup>3</sup> /s

Le coefficient d'efficience EF présente une valeur de 0,67, légèrement supérieure à celle obtenue lors du calibrage. Le comportement du critère de Nash sur la période de contrôle permet de conclure à la robustesse de la performance de la modélisation TOLOFI.

##### III-4.4.1.2 Régression des moindres carrés

La régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs en mm des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes est présentée sur le graphique de la figure III-28 pour la phase de validation.

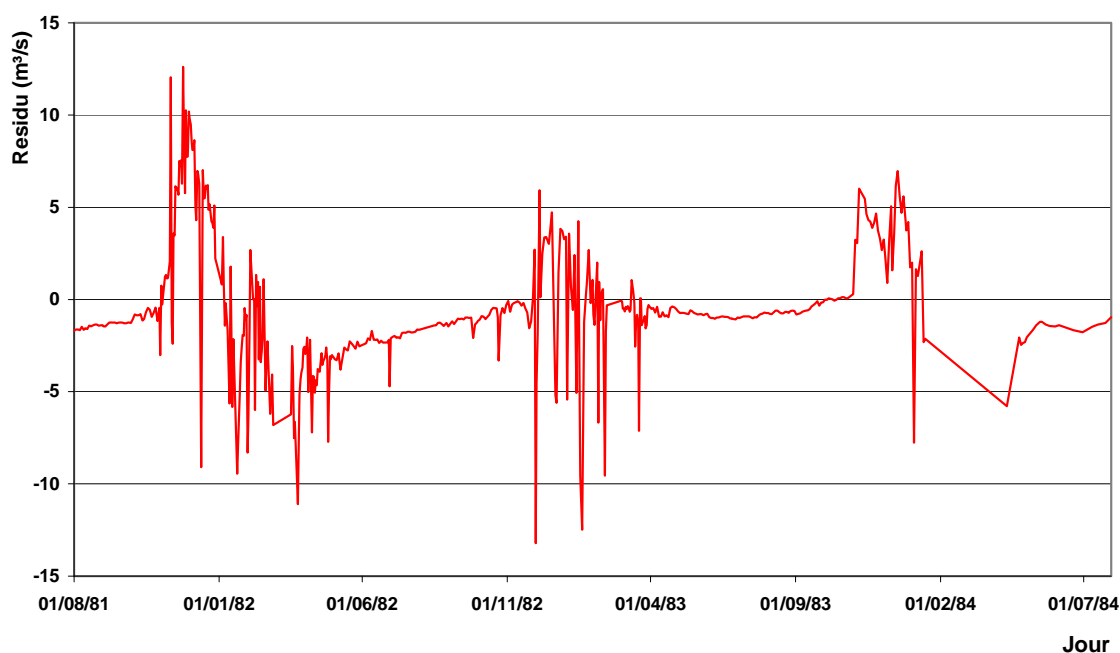


**FIGURE III-28: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolofi}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation sur la période d'août 81 à juillet 84 (run 6KUL2) - Bassin de la Tolomosa**

Le coefficient de régression a une valeur de 0,84. On constate donc une bonne corrélation entre les valeurs des données observées et simulées, malgré une certaine tendance à la sous-estimation des données simulées par rapport à celles observées. Soulignons que cette tendance à la sous-estimation est plus faible que dans le cas du calibrage.

### III-4.4.1.3 Evolution des résidus

L'évolution de la différence en  $m^3/s$  entre les débits observés  $Q_{obs}$  et les débits simulés  $Q_{tofofi}$  (résidus) est donnée sur le graphique de la figure III-29.



**FIGURE III-29: résidus en  $m^3/s$  pour la phase et période de validation de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa**

L'examen du graphique montre que, de manière générale, les résidus sont plus importants durant la période pluvieuse de décembre à avril. L'écart-type résiduel de  $5,2 m^3/s$  est inférieur à celui obtenu lors de la phase de calibrage; multiplié par deux; il donne l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des résidus.

### III-4.4.2 RESULTATS DE LA PHASE DE VALIDATION

Le tableau III-14 présente, globalement pour le bassin versant, les valeurs respectives des écoulements simulés annuels par année hydrologique sur la période de 1981 à 1984.

**TABLEAU III-14: résultats de la validation de la simulation TOLOFI des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période 1981–84 (run 6KUL2) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
81-82	1.335	815	472	43	42	515
82-83	707	505	195	21	20	216
83-84	1.133	702	339	46	48	422
<b>Moyenne annuelle</b>	<b>1.058</b>	<b>674</b>	<b>336</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>384</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SUR\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

On constate que la différence entre les précipitations annuelles et les écoulements totaux ne correspond pas toujours aux pertes du bilan en eau annuel sous forme d'ETR, ce qui révèle une sur-estimation de la valeur simulée d'ETR via la modélisation TOLOFI. On remarque aussi que pratiquement toute l'eau qui recharge l'aquifère superficiel se transforme en écoulement de base. En effet, les valeurs des paramètres GW\_DELAY (variable de retard en jour de la recharge de l'aquifère)

et GWQMN (seuil de la hauteur de l'eau dans l'aquifère superficiel requis pour déclencher l'écoulement de base) ont été, lors de la phase de calibrage, délibérément choisies pour favoriser l'écoulement de base.

Le tableau III-15 présente, globalement pour le bassin versant, les résultats de la simulation des écoulements mensuels moyens de la phase de validation sur la période de 1981 à 1984 de la modélisation TOLOFI.

**TABLEAU III-15: résultats de la validation de la simulation TOLOFI des écoulements mensuels moyens sur la période de 1981 à 1984 (SWAT run 6 KUL partie 2) - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
Août	3	6	1	0	0	1
Septembre	11	10	1	0	0	1
Octobre	53	24	3	0	1	3
Novembre	162	78	30	1	5	31
Décembre	187	107	54	4	7	58
Janvier	231	130	70	6	12	76
Février	205	133	74	9	10	82
Mars	135	108	61	7	2	68
Avril	57	47	33	4	0	37
Mai	10	20	16	2	0	18
Juin	0	7	5	1	0	6
Juillet	2	5	1	1	0	2
<b>TOTAL</b>	<b>1.058</b>	<b>674</b>	<b>348</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>384</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

#### III-4.4.3 EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA VALIDATION

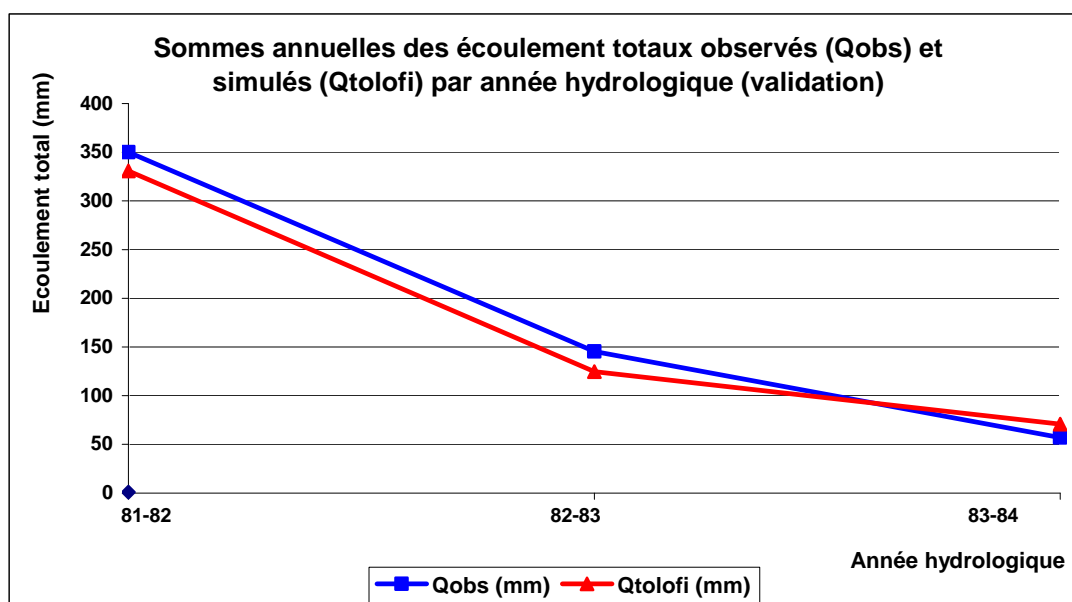
L'analyse porte sur la comparaison entre les résultats de la simulation et les données observées disponibles. Rappelons que les observations journalières ne sont pas continues, surtout pour les trois dernières années de la phase de validation. Comme la comparaison des bilans ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observation, les sommes suivantes correspondent alors à la somme annuelle ou mensuelle jour à jour, uniquement lorsqu'une donnée observée correspond à une donnée simulée.

##### III-4.4.3.1 Sommes annuelles des écoulements totaux

La comparaison des sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par SWAT est illustrée par année hydrologique (81-82, 82-83 et 83-84) dans le tableau III-16 et sur le graphique de la figure III-30.

**TABLEAU III-16: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Q observé (mm)	Q tolofi (mm)
1981-82	350	331
1982-83	146	124
1983-84	57	71



**FIGURE III-30: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa**

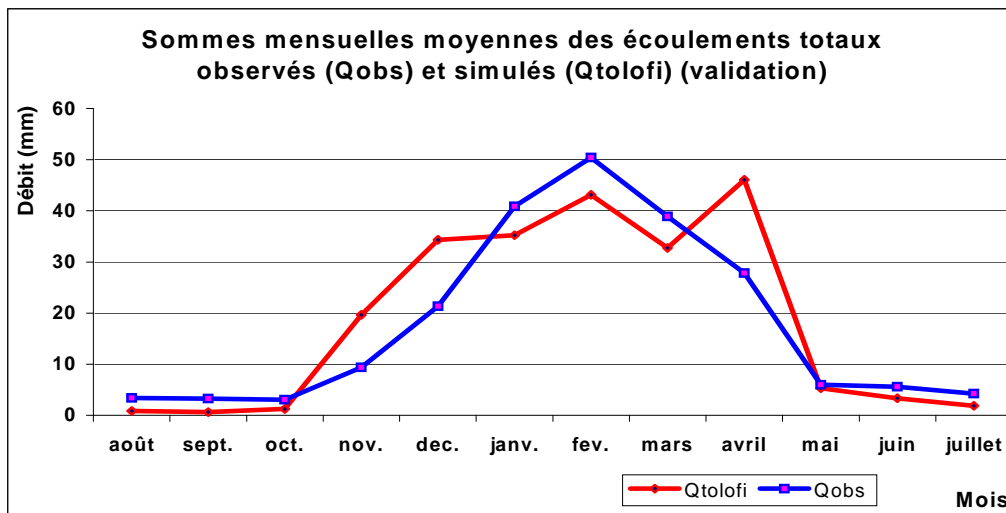
On constate un bon alignement entre les courbes des données observées et simulées, avec une légère sous-estimation de l'écoulement simulé par rapport à celui observé pour les deux premières années. La tendance vers le bas de la valeur absolue des écoulements est simplement provoquée par la diminution du nombre de données historiques disponibles (confer tableau II-6).

#### **III-4.4.3.2 Sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux**

La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) par SWAT aux dates correspondantes est donnée pour la phase de validation par année hydrologique (81-82 à 83-84) dans le tableau III-17 et sur le graphique de la figure III-31.

**TABLEAU III-17: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Q observé (mm)	Q tolofi (mm)
Août	3	1
Septembre	3	1
Octobre	3	1
Novembre	9	20
Décembre	21	34
Janvier	41	35
Février	50	43
Mars	39	33
Avril	28	46
Mai	6	5
Juin	6	3
Juillet	4	2
<b>TOTAL</b>	<b>214</b>	<b>224</b>



**FIGURE III-31: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation (1981-84) - Bassin de la Tolomosa**

#### **III-4.4.3.3 Écoulements journaliers**

L'évolution des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) est comparée aux dates correspondantes pour la phase et période de validation (1981 à 1984) sur le graphique de la figure III-32. Comme les données observées ne sont pas complètes, les données reportées de simulation sont uniquement celles qui correspondent à une donnée observée.

### Écoulements journaliers observés et simulés 1981 - 84

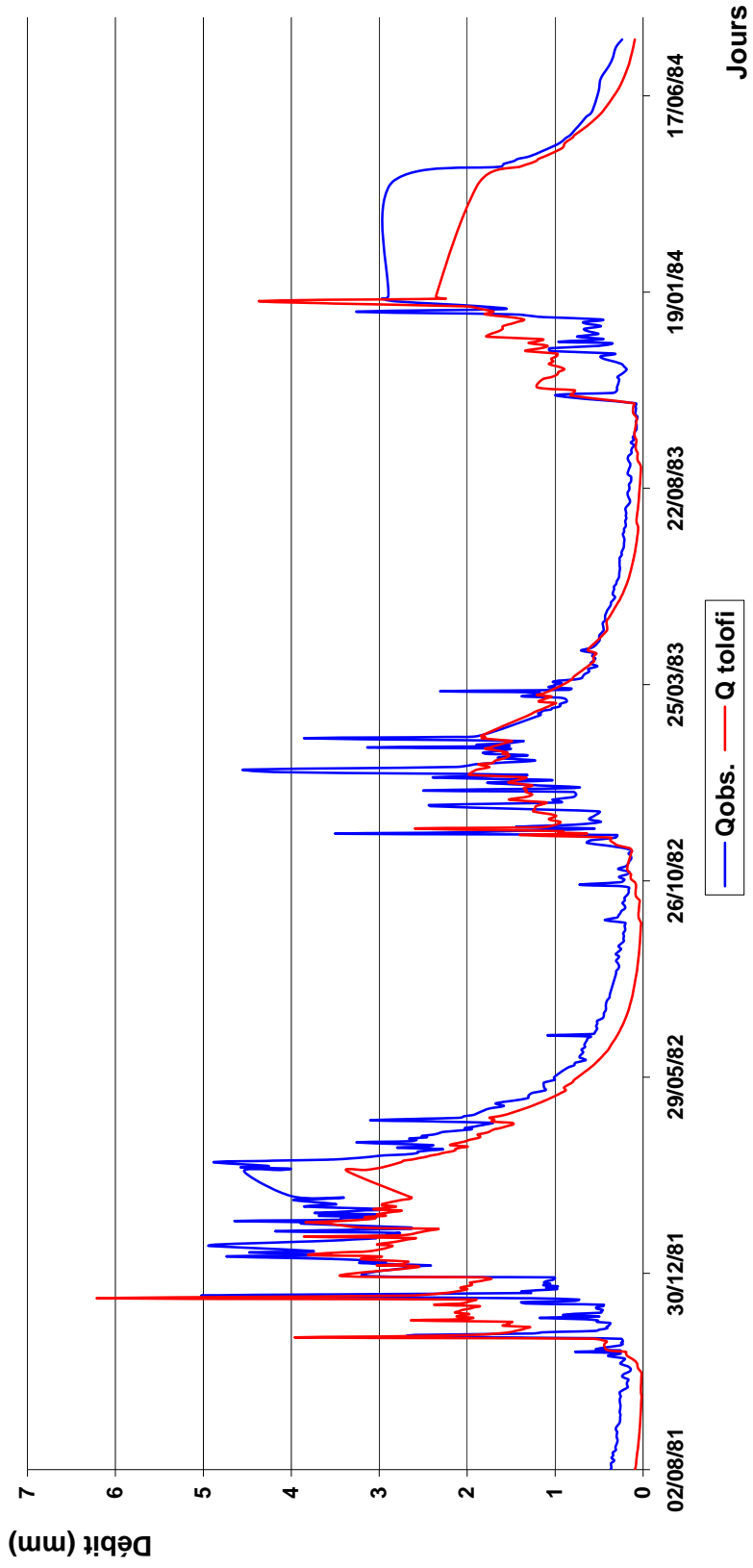
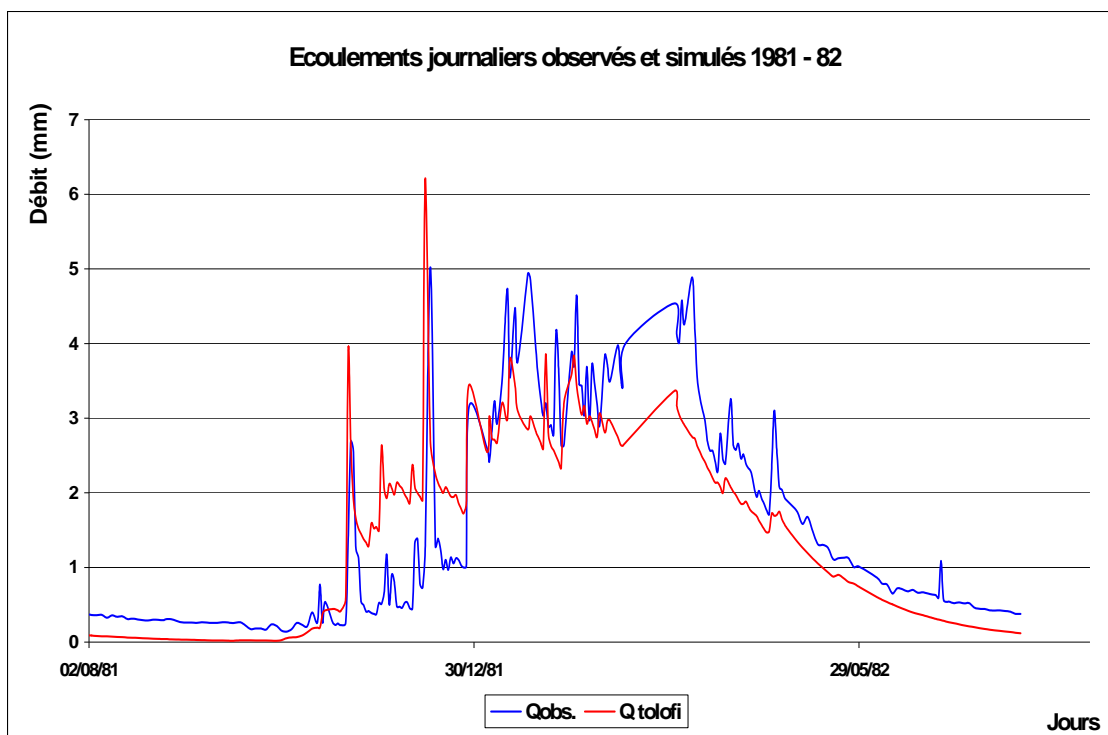


FIGURE III-32: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1984. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa

L'observation des hydrogrammes de la phase de validation montre un bon respect des fluctuations saisonnières. L'allure générale de l'hydrogramme saisonnier simulé est semblable à celle de l'hydrogramme observé.

Durant l'époque d'étiage, lorsque l'écoulement de base est prédominant, les débits obtenus de la simulation montrent une bonne concordance avec les débits observés, malgré une légère sous-estimation de la récession.

Le graphique de la figure III-33 reprend l'évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants en mm pour la phase de validation de la période 1981 à 1982 uniquement.



**FIGURE III-33: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) correspondants en mm pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1982. Station de San Jacinto (run 6 KUL2) - Bassin de la Tolomosa**

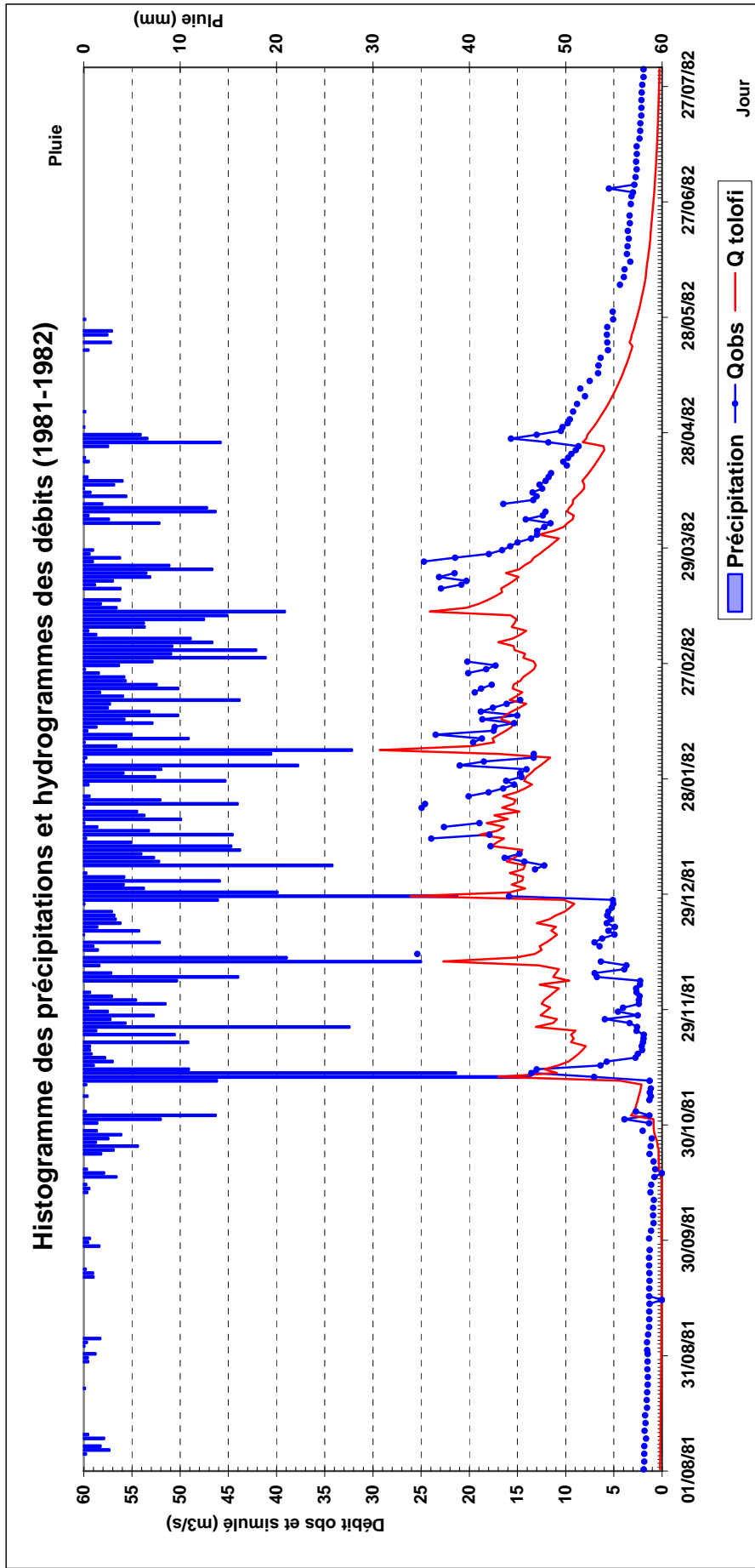
Grâce à la figure III-33, nous pouvons mieux remarquer la différence d'ordre de grandeur entre les débits simulés et mesurés, tout en ayant une similitude dynamique du fonctionnement hydrologique. On constate aussi une correspondance générale entre les pics observés et simulés.

#### **III-4.4.3.4 Histogramme des précipitations journalières et hydrogrammes des écoulements**

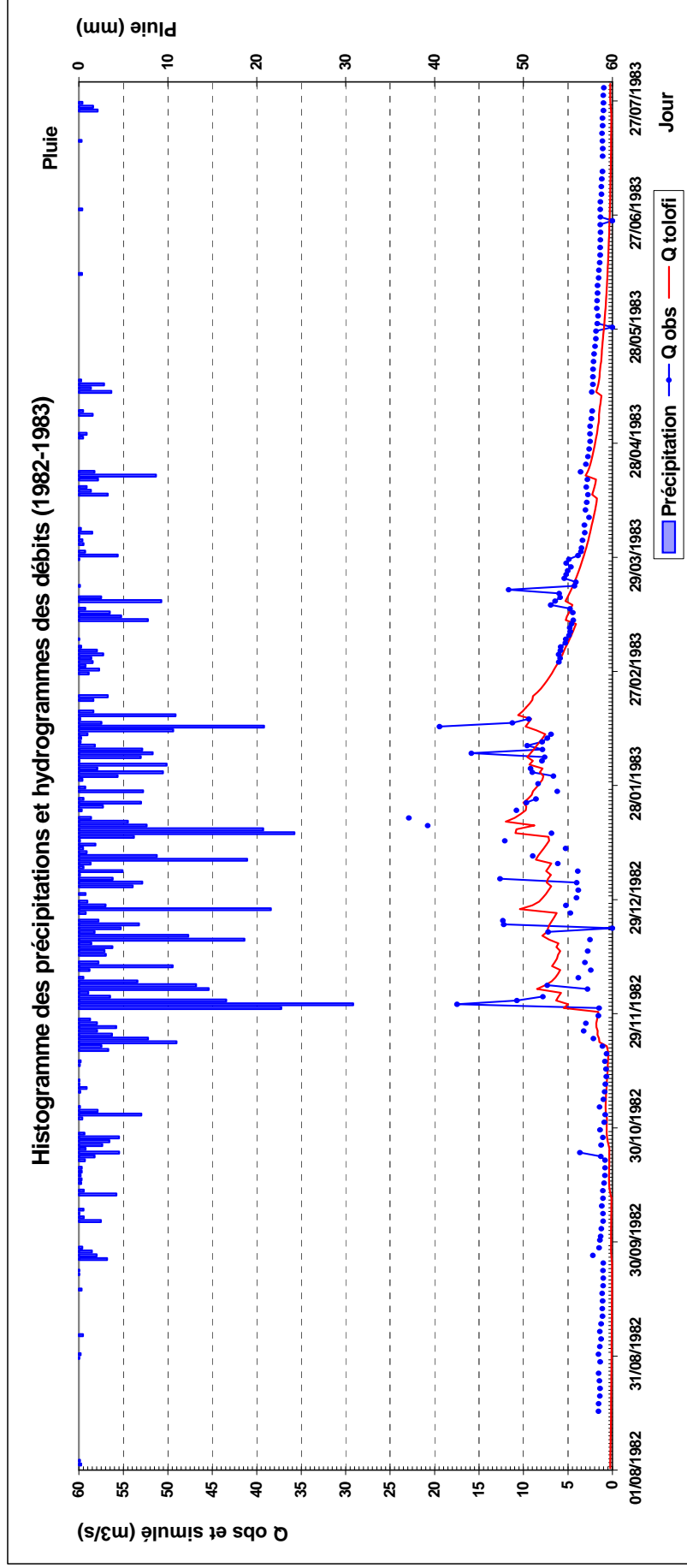
Les figures III-34 à III-36 comparent, par année hydrologique, les débits journaliers disponibles ( $Q_{obs}$ ) et l'ensemble des débits simulés<sup>1</sup> ( $Q_{tolofi}$ ) en regard des valeurs journalières de l'histogramme des précipitations correspondantes.

On remarquera que, pour les mêmes dates, il n'existe pas toujours une donnée observée.

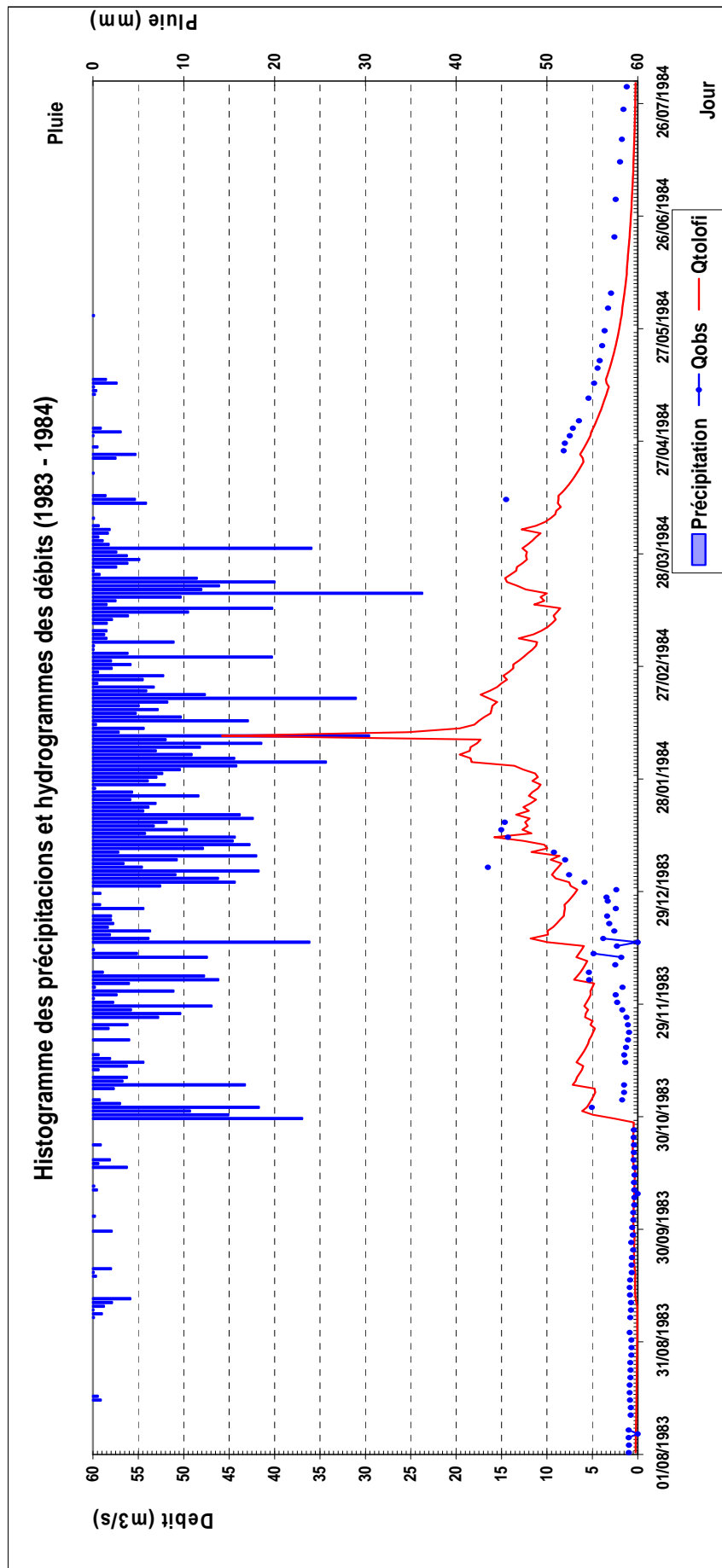
<sup>1</sup> Les données simulées proviennent du fichier WATOUT non épuré



**FIGURE III-34:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1982



**FIGURE III-35:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1982 à 1983



**FIGURE III-36:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolofi}$ ) de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) et histogramme des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1983 à 1984

La comparaison par année entre l'histogramme des précipitations et les hydrogrammes des écoulements observés et simulés montre le respect général de la fluctuation saisonnière.

La comparaison annuelle entre l'histogramme des précipitations et les hydrogrammes des écoulements observés et simulés indique le respect général de la fluctuation saisonnière. La meilleure corrélation visuelle entre pics de précipitations et pics de débits est obtenue sur la période de 1981 à 1982. Durant les deux dernières années, l'amplitude des pics de débits est peu marquée. Enfin, on constate que, pour les mêmes dates, il n'existe pas toujours une donnée observée (confer annexe II-1).

### III-4.5 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats de la simulation sont analysés en examinant les débits observés et simulés au niveau annuel, mensuel et journalier sur la période de 1977 à 1984.

#### III-4.5.1 BILAN HYDROLOGIQUE

Les résultats concernent l'ensemble des années de calibrage et validation, c'est-à-dire les années hydrologiques de 1977 à 1984. Le tableau III-18 présente pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs annuelles moyennes simulées des termes du bilan en eau par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

**TABLEAU III-18: résultats annuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOFI (run 6KUL2) sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Par année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Ecoulement total (1) (mm)
<b>Moyenne</b>	1.214	771	398	44	44	442

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Le tableau III-19 présente, globalement pour le bassin versant de la Tolomosa, les valeurs mensuelles moyennes simulées des termes du bilan en eau par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

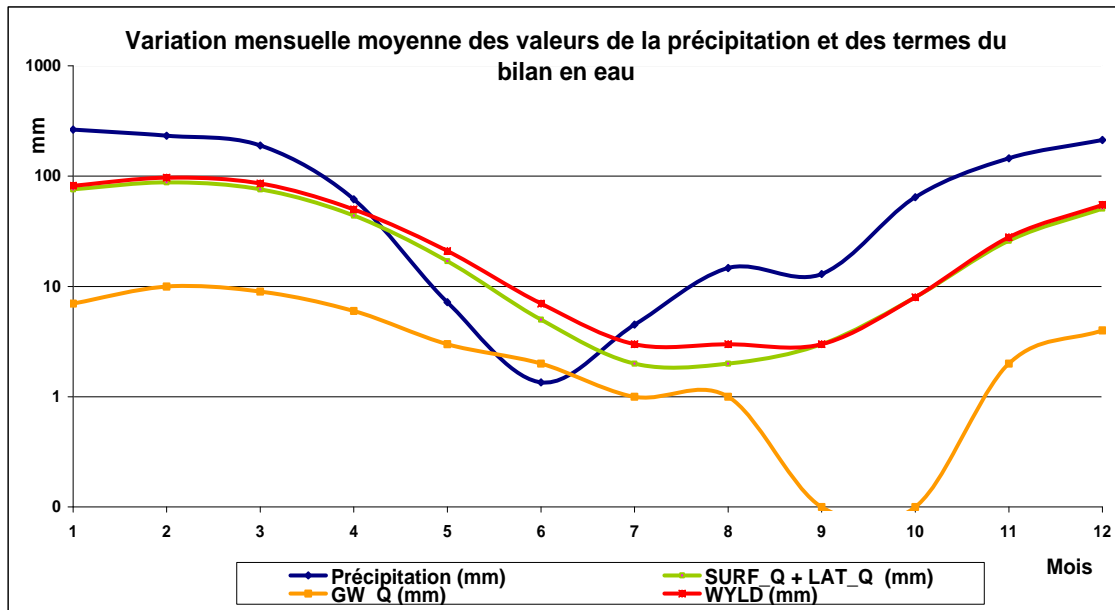
**TABLEAU III-19: résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOFI (run 6 KUL partie 2) sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Ecoulement total (1) (mm)
Août	15	11	2	1	0	3
Septembre	13	13	3	0	0	3
Octobre	64	37	8	0	1	8
Novembre	146	75	26	2	4	28
Décembre	213	117	51	4	8	55
Janvier	265	143	76	7	13	82
Février	233	143	88	10	12	97
Mars	190	134	76	9	5	86
Avril	62	62	44	6	1	50
Mai	7	21	17	3	0	21
Juin	1	8	5	2	0	7
Juillet	5	7	2	1	0	3
<b>TOTAL</b>	<b>1.214</b>	<b>771</b>	<b>398</b>	<b>44</b>	<b>44</b>	<b>442</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Les graphiques de la figure III-37 indiquent la variation mensuelle moyenne des précipitations et des termes du bilan en eau simulés de 1977 à 1984. Rappelons que WYLD est la quantité nette totale à l'exutoire du bassin versant, avec:  $WYLD = SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q$ .



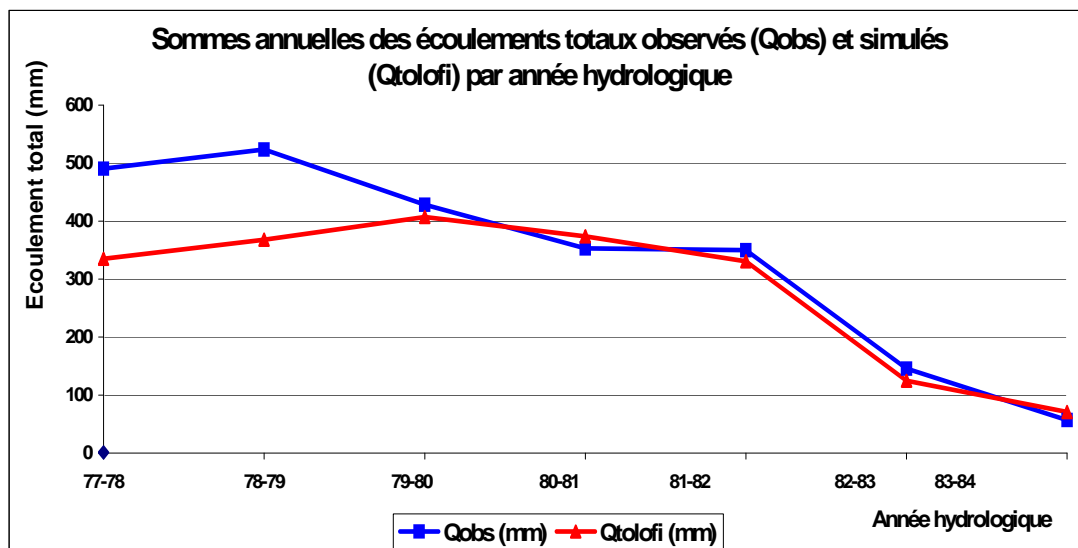
**FIGURE III-37: variation mensuelle moyenne des valeurs de précipitations et des termes du bilan en eau – Bassin de la Tolomosa**

Les évolutions SURF\_Q + LAT\_Q et WYLD suivent le mouvement saisonnier de la pluie. Par contre, malgré une croissance du régime pluvieux à partir du mois de juin, on constate un retard dans la réponse de l'écoulement total qui ne se déclenche que vers le mois d'octobre.

La part de l'écoulement de surface et hypodermique (SURF\_Q + LAT\_Q) dans le débit total à l'exutoire est beaucoup plus importante que l'écoulement souterrain (GW\_Q). Rappelons aussi que le débit de base simulé est systématiquement sous-estimé par rapport au débit de base observé.

#### III-4.5.2 HYDROGRAMMES ANNUELS

L'écoulement total annuel observé et simulé par SWAT est donné sur le graphique de la figure III-38 pour la phase de calibrage par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.



**FIGURE III-38: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Comme constaté précédemment, il existe durant les deux premières années hydrologiques (1977–78 et 1978–79) une sous-estimation marquée des écoulements simulés par rapport aux écoulements observés. Cette différence d'amplitude diminue après la troisième année.

#### III-4.5.3 HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES DES ECOULEMENTS

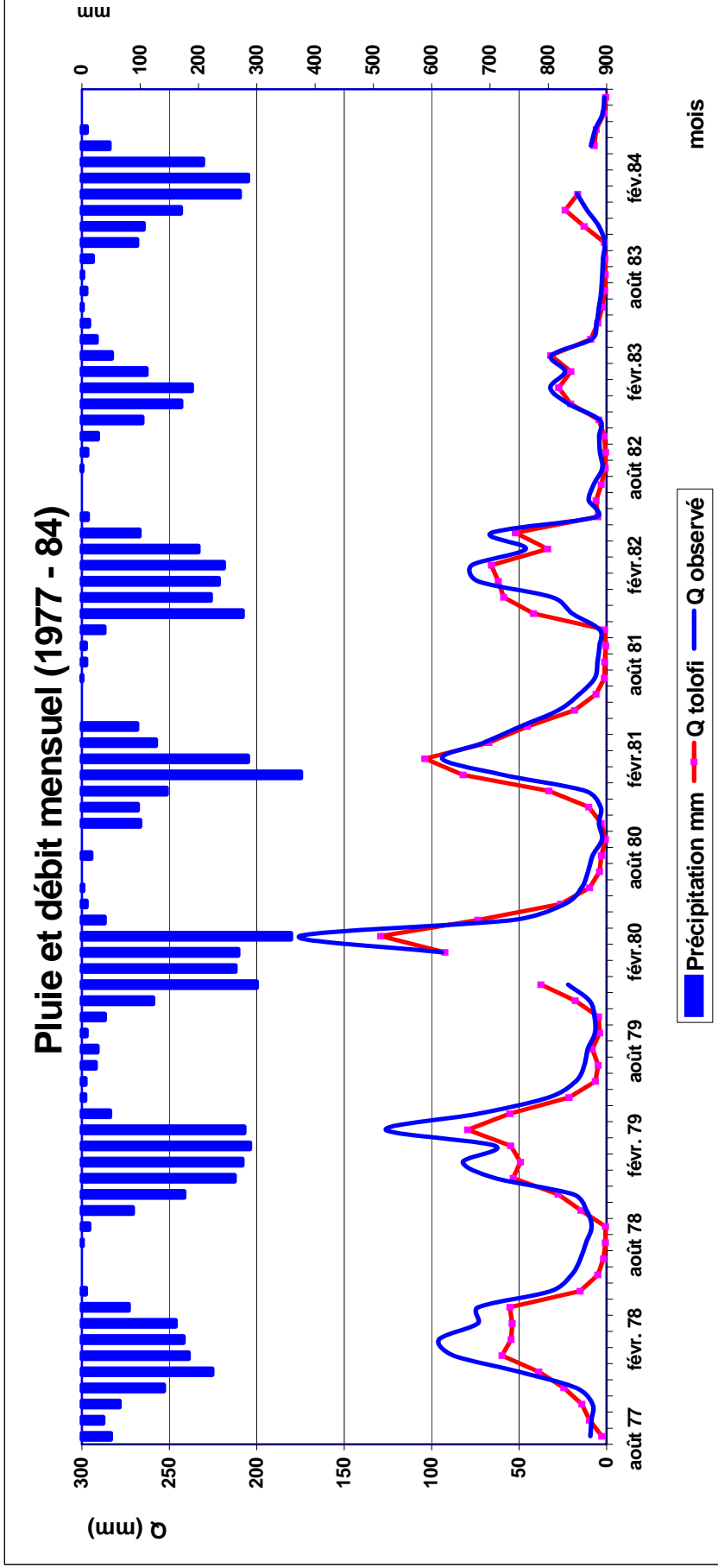
Le graphique de la figure III-39 compare les hydrogrammes partiels du total mensuel des débits disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) pour les mêmes dates avec l'histogramme des précipitations mensuelles. Remarquons que, entre autres, les mois de janvier 1980, février 1984 et mars 1984 sont sans données observées.

L'allure de la variation saisonnière et la position chronologique respective des hautes et basses eaux des hydrogrammes permettent de classer le régime du débit de la rivière en un régime simple, caractérisé par un seul maximum et un seul minimum annuel traduisant la prépondérance du mode d'alimentation pluvial.

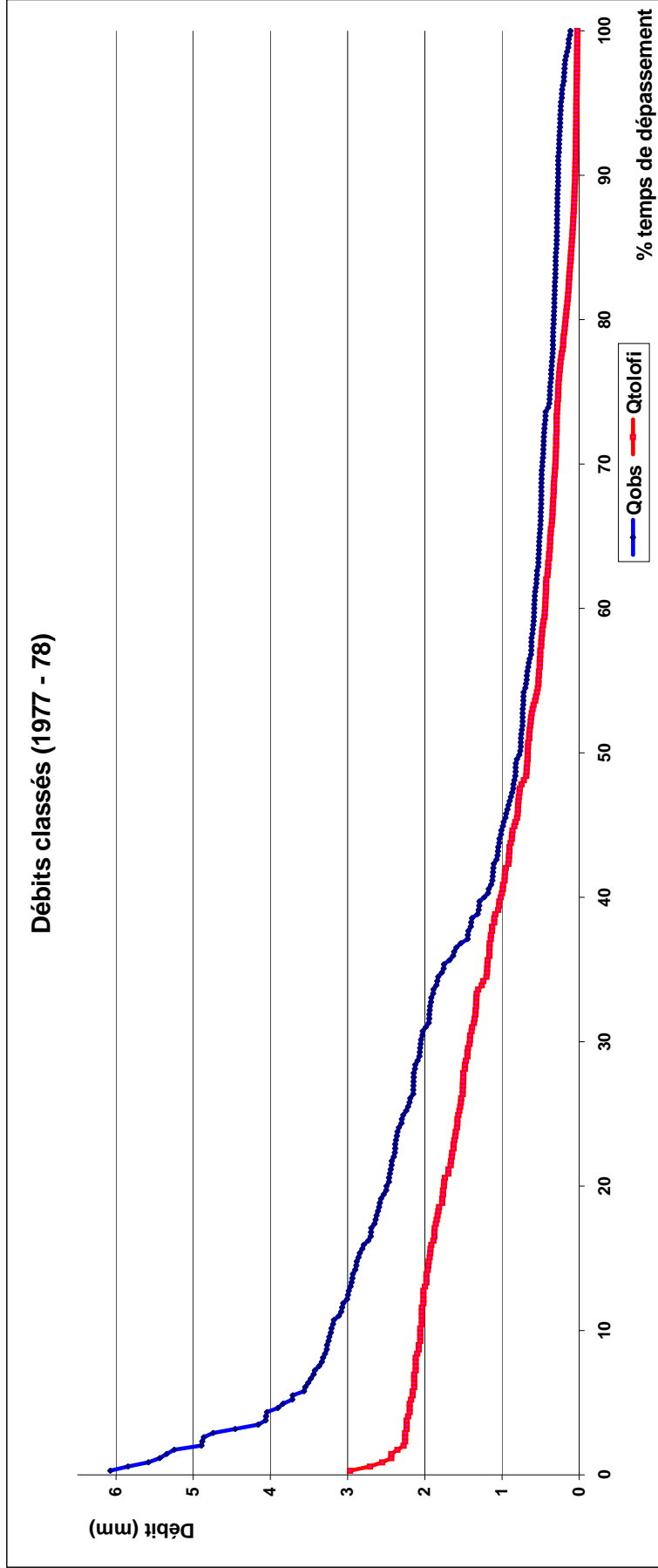
L'étiage à la fin de la saison sèche de mai à octobre est bien marqué.

#### III-4.5.4 DEBITS CLASSES

En dehors de la visualisation chronologique de l'amplitude et de la dynamique des débits, on peut ordonner la succession des débits journaliers par ordre de grandeur croissante ou décroissante. Ce mode de classement est dit monotone. Les figures III-40 à III-46 donnent par année (en ordonnée) la valeur en pourcentage du débit observé ( $Q_{obs}$ ) ou simulé ( $Q_{tolofi}$ ) atteinte ou dépassée sur la période d'observation (en abscisse). A défaut de séries annuelles observées complètes, ce classement est effectué en tenant compte uniquement des valeurs des dates d'observations.



**FIGURE III-39:** évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes (TOLOFI, run 6KUL2) - Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-40: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) sur l'année hydrologique 1977-78 – Bassin de la Tolomosa**

### Débits classés (1978 - 79)

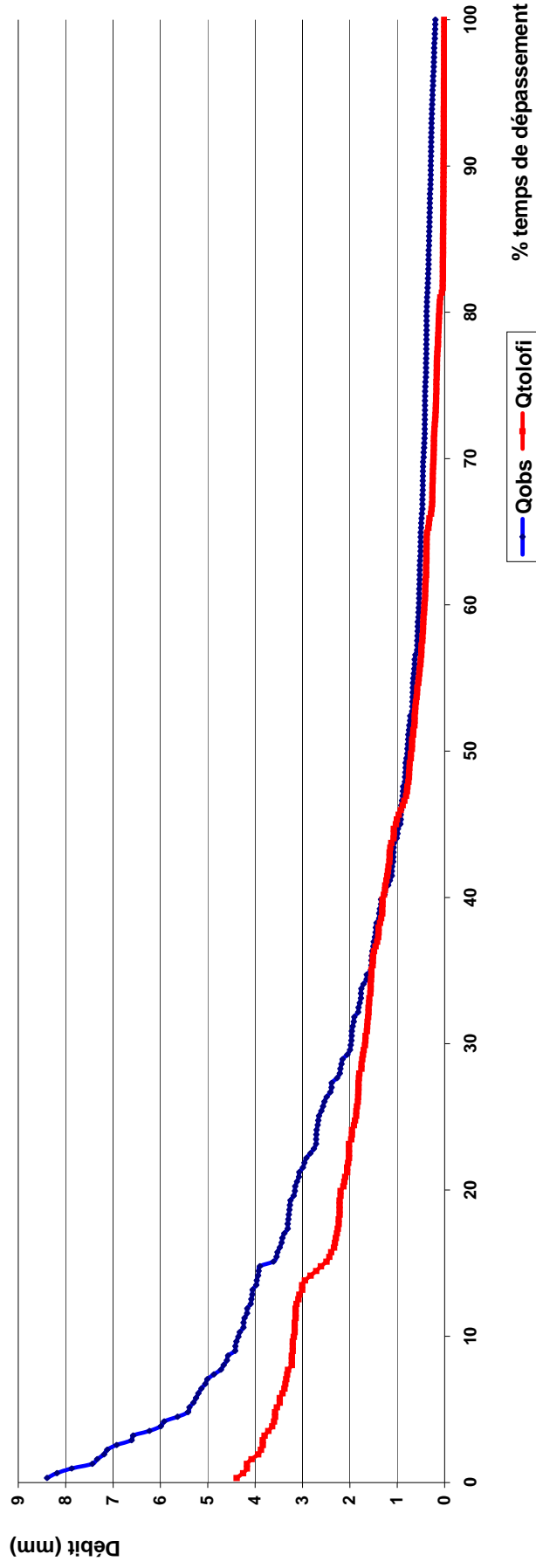


FIGURE III-41: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) sur l'année hydrologique 1978-79 – Bassin de la Tolomosa

### Débits classés (1979-80)

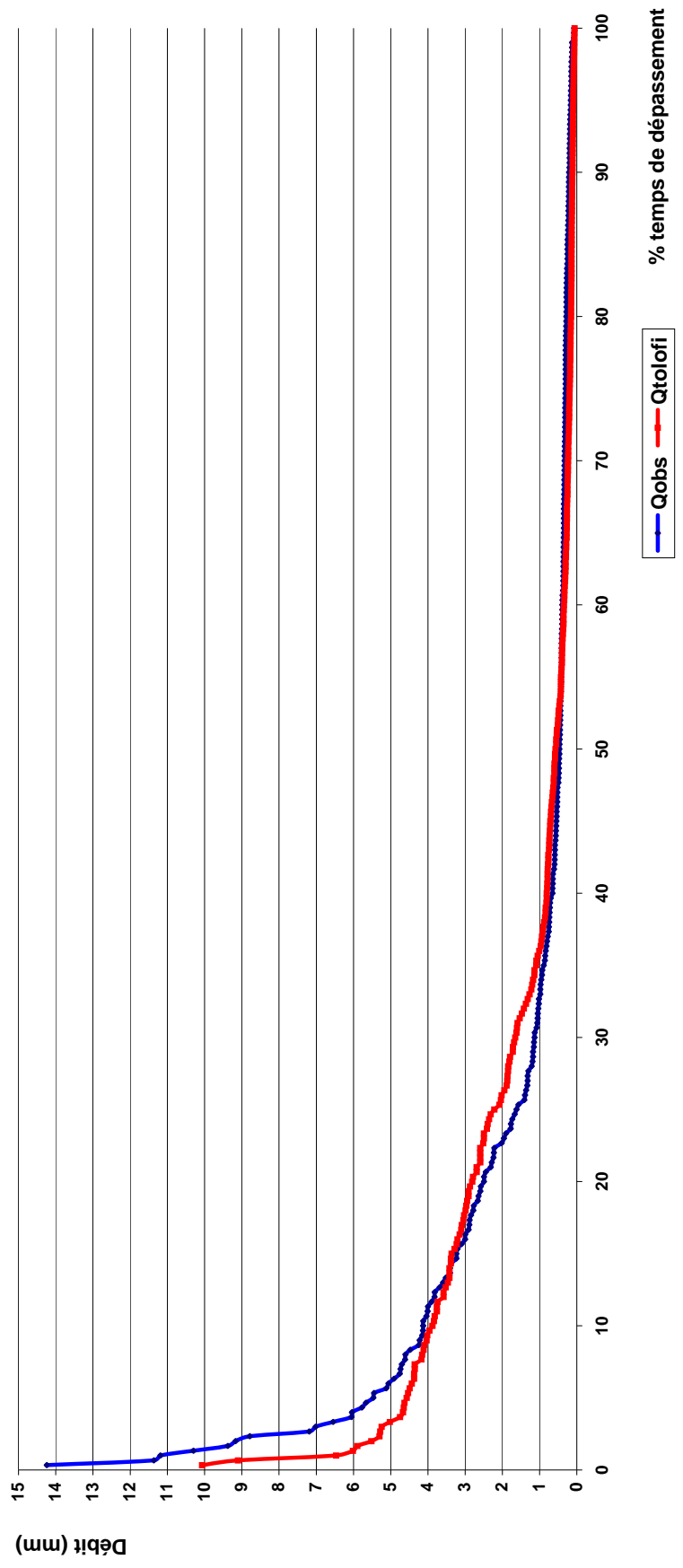


FIGURE III-42: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) sur l'année hydrologique 1979-80 – Bassin de la Tolomosa

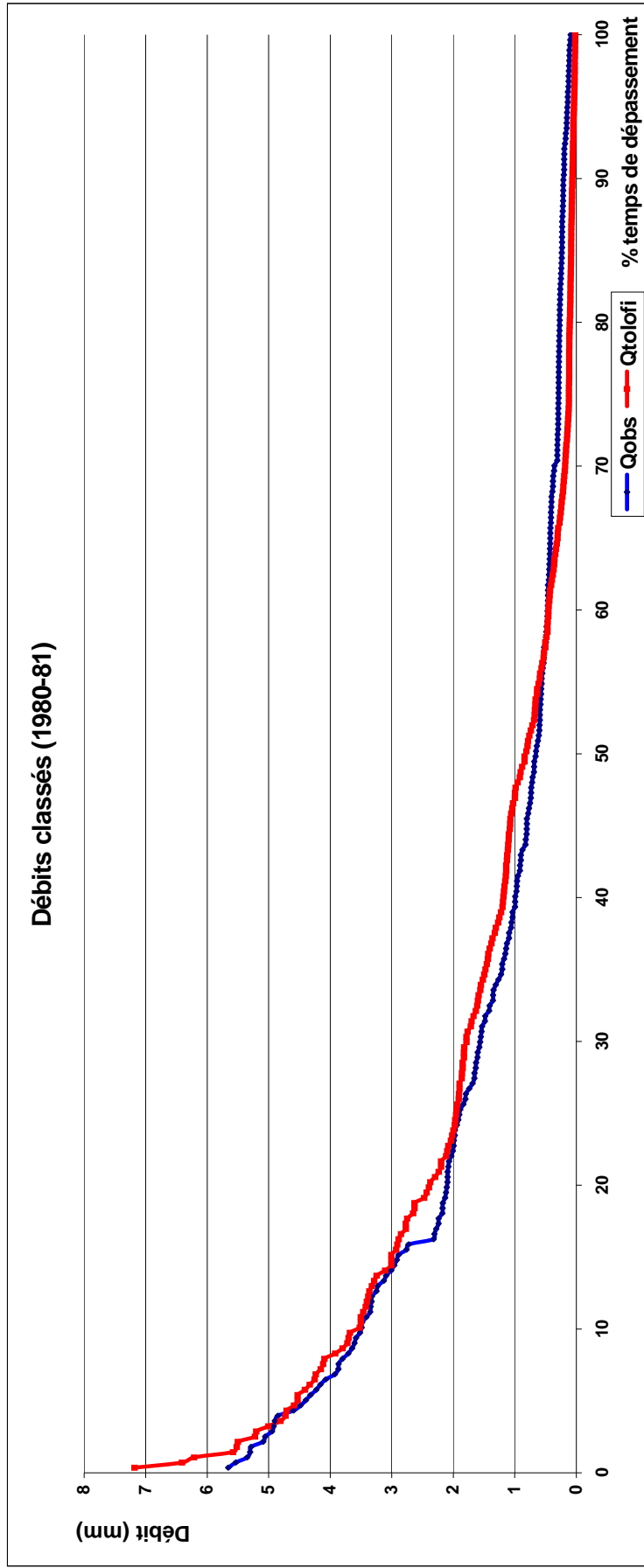
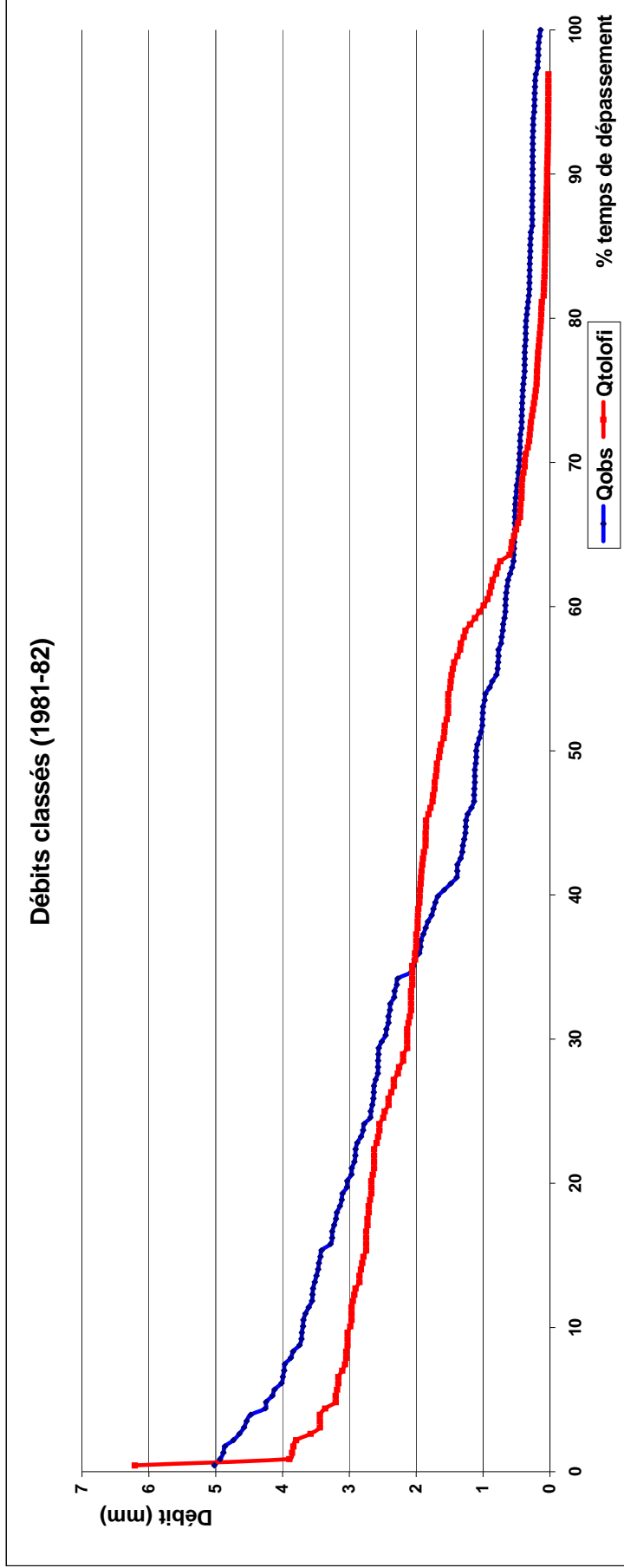


FIGURE III-43: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) sur l'année hydrologique 1980-81 – Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-44:** comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) sur l'année hydrologique 1981-82 – Bassin de la Tolomosa

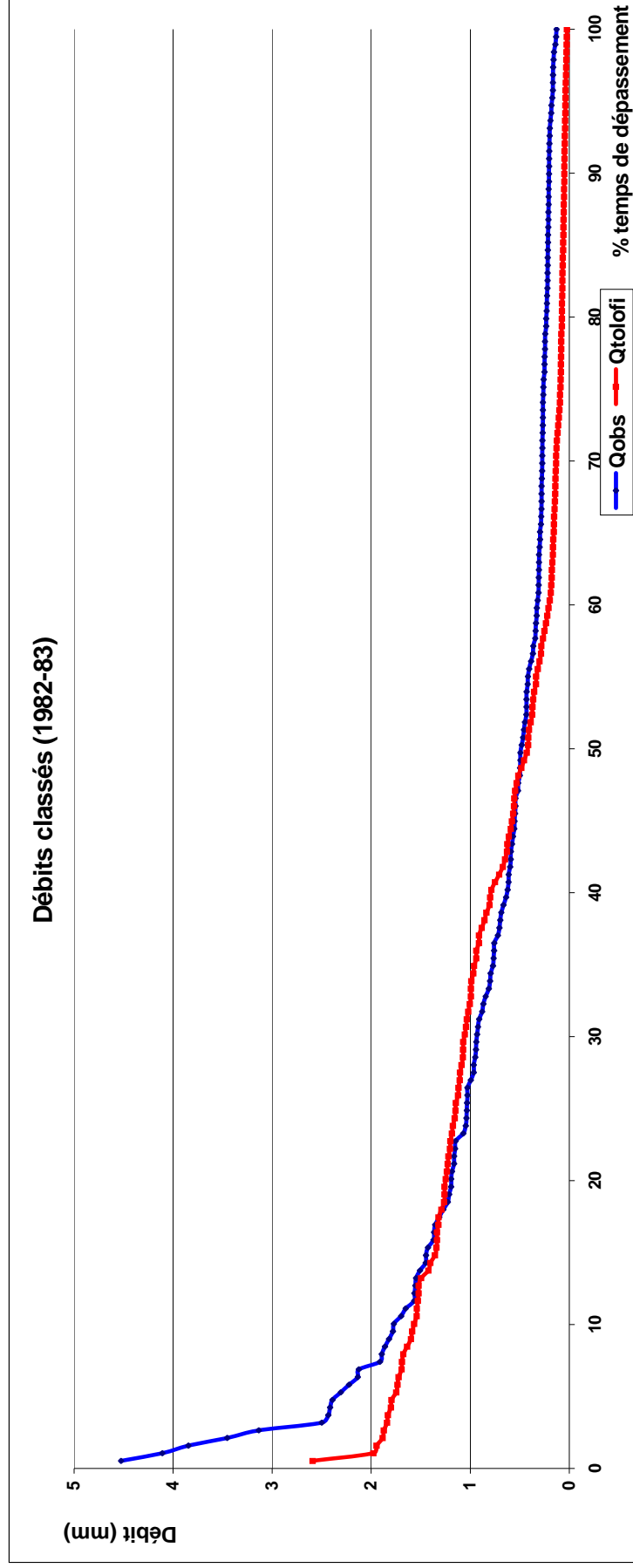
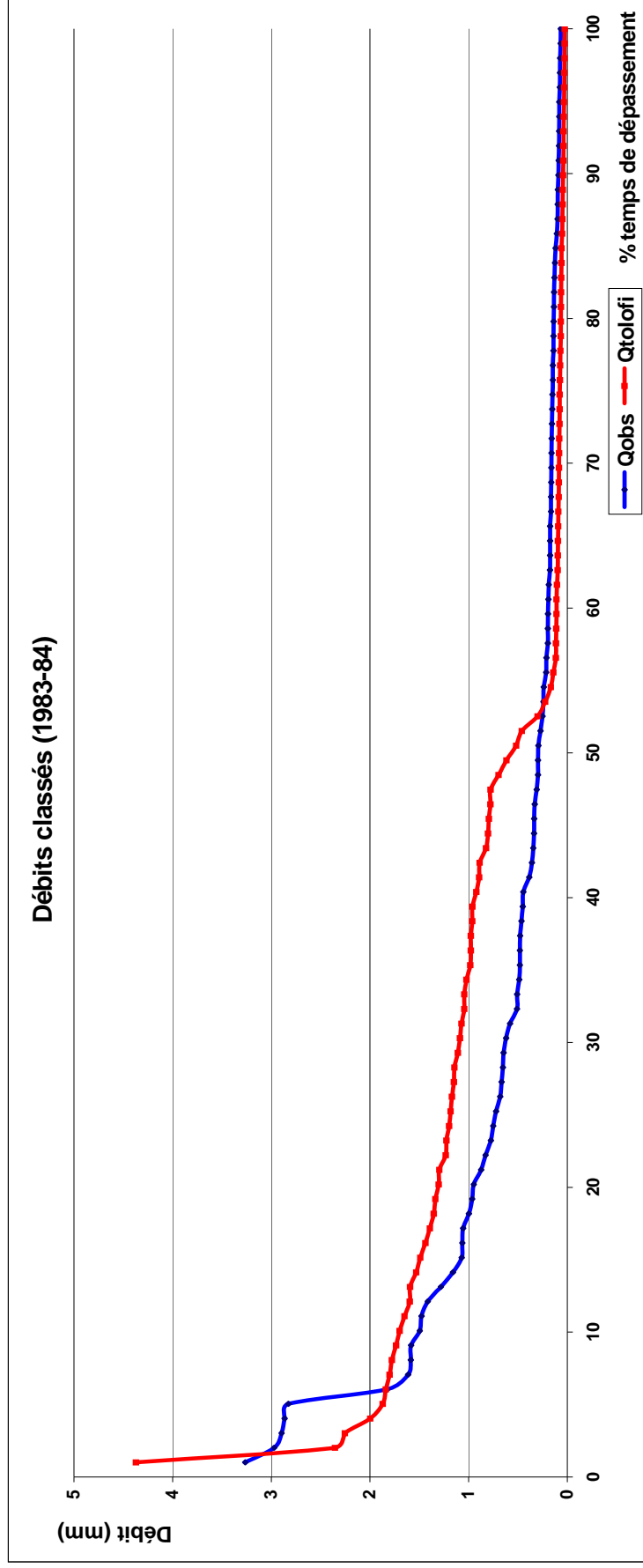


FIGURE III-45: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ) sur l'année hydrologique 1982-83 – Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-46: comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{totlofi}$ ) sur l'année hydrologique 1983-84 – Bassin de la Tolomosa**

L'observation des courbes de débits classés permet de constater la capacité du modèle à bien reproduire dans son ensemble la distribution fréquentielle du débit. L'analyse visuelle des courbes de débits classés confirme la sous-estimation du débit simulé par rapport au débit observé. Durant la première année (1977-78), 35% des débits simulés sont nettement inférieurs aux débits observés. A partir de l'année hydrologique 1979-80, on constate un rapprochement des deux courbes avec, parfois, une tendance vers des débits simulés légèrement supérieurs aux débits observés, par exemple en 1982 et 1983.

Ces courbes de fréquence ont un sens relatif, permettant seulement de voir l'évolution en fréquence du débit, y compris de crue et d'étiage, et ne peuvent constituer par la taille de l'échantillon de données observées de débit, une évaluation fiable en absolu pour les fréquences rares. Cependant, elles permettent de définir, en hydrologie notamment, les débits caractéristiques suivants:

- Débit caractéristique maximum ou débit caractéristique de crue DCC (dépassé 10 jours par an ou 3%).
- Débit caractéristique d'étiage DCE (dépassé 365 jours par an ou 100%).
- Débit caractéristique moyen (dépassé six mois par an ou 50%).

Compte tenu des analyses précédentes, les débits caractéristiques maximums simulés apparaissent comme peu valables; seuls sont alors repris dans le tableau III-20 les débits d'étiage et moyens.

**TABLEAU III-20: débits caractéristiques simulés annuels et d'étiage (DCE) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Débit d'étiage (DCE) (mm/jour)	Débit moyen (mm/jour)
77-78	0,07	0,73
78-79	0,03	0,80
79-80	0,13	0,56
80-81	0,05	0,97
81-82	0,05	1,76
82-83	0,06	0,31
83-84	0,55	0,55
<b>Moyenne</b>	<b>0,13</b>	<b>0,81</b>

Les résultats des débits caractéristiques d'étiage et moyens indiquent respectivement la valeur en mm/jour du débit journalier dépassé 365 jours par an ou six mois par an et donc, non atteinte durant les six mois restants. Ces résultats seront considérés avec prudence compte tenu des incertitudes associées à la modélisation et aux données d'observation.

### III-4.6 RENDEMENT EN SEDIMENT

Rappelons que le rendement annuel en sédiment, calculé à partir des bathymétries effectuées dans le réservoir de San Jacinto, est de 14,5 t/ha/an (confer point II-4.5). La valeur simulée du rendement moyen annuel en sédiment (SYLD) pour le bassin et par sous-bassin est présentée dans le tableau III-21.

**TABLEAU III-21: rendement moyen annuel en sédiment (SYLD) estimé par sous-bassin via la modélisation TOLOFI (run 6KUL, partie 2) sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin ou HRU	SYLD annuel (t/ha)
TolomosaA	0,8
Mena	44,7
Sola	1,6
Pinos	0,8
Bassin versant	7,8

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

Le taux annuel de rendement en sédiment calculé par le modèle SWAT correspond à 54% de celui calculé sur base de la bathymétrie, avec seulement 7,8 t/ha/an. Les valeurs obtenues par sous-bassin indiquent une forte érosion dans le sous-bassin de la Mena, avec 45 t/ha/an et varient de 0,8 t/ha/an à 1,6 t/ha/an dans les autres sous-bassins.

### **III-4.7 CONCLUSIONS DE LA MODELISATION**

Pour pouvoir se rapprocher le plus possible des processus hydrologiques naturels rencontrés dans le bassin versant, les valeurs des paramètres de la modélisation TOLOFI soit ont été fixées en fonction des caractéristiques biophysiques du bassin, soit optimisées durant la phase de calibrage ou, enfin, laissées par défaut. Certains paramètres non identifiés durant l'analyse de sensibilité ont été inclus dans la phase de calibrage tels qu'USLE-K et SHALLST.

Comme les mesures de débit sont éparées et représentent une moyenne de trois observations journalières, le modèle réagit faiblement sur les périodes de crue, comme cela se remarque visuellement en comparant les hydrogrammes des débits journaliers observés et simulés qui décrochent largement pour les hauts débits.

La différence entre les observations et les simulations pourrait aussi provenir d'une sur-estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) simulée par le modèle, ou du choix des unités de sol considérées par la modélisation comme dominantes dans le sous-bassin. Si on prend le cas du sous-bassin TolomosaA, la modélisation TOLOFI considère l'unité LEDB(2) comme le sol majoritaire couvrant 27% de la superficie du sous-bassin. Aussi, le sol JDER(2), classé dans le groupe hydrologique C, n'est plus pris en compte par la modélisation, bien qu'il couvre 21% de la superficie du sous-bassin, principalement la partie fluvio-lacustre (confer tableau II-19), où l'intensité de la pluie peut dépasser très rapidement la vitesse d'infiltration du sol et entraîner le ruissellement. Ceci explique aussi en partie pourquoi, pour l'ensemble du bassin versant, l'écoulement hypodermique prédomine par rapport au ruissellement de surface, puisque le sol dominant de chaque sous-bassin appartient au seul groupe hydrologique B.

Le rendement en sédiment modélisé via TOLOFI confirme les données de la carte du degré d'érosion rencontré dans le sous-bassin Mena qui souffre effectivement d'un degré d'érosion sévère à très sévère (confer carte de la figure I-10). Cette assertion est appuyée par les observations visuelles faites en périodes de hautes eaux à la confluence des rivières Tolomosa et Mena qui montrent les eaux de la Mena de couleur brune chargées en sédiment tandis que celles de Pinos et Sola sont beaucoup plus limpides. Cependant, dans le cas du sous-bassin TolomosaA, rappelons que les résultats de la modélisation ne semblent pas tenir compte de la partie fluvio-lacustre qui révèle un degré très sévère d'érosion sous forme de ravinement profond.

### **III-5 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLOMAT**

La modélisation TOLOMAT du bilan en eau du bassin versant (situation actuelle) ne diffère de la modélisation TOLOFI que par l'emploi des CN issus de la matrice d'experts.

#### **III-5.1 PARAMETRE CN**

La première modélisation a utilisé les valeurs du CN issues du calcul par le modèle pour chaque unité de réponse hydrologique assimilée à un sous-bassin versant. Pour tenter d'augmenter le poids relatif des données obtenues du terrain, la modélisation TOLOMAT donne une large part au système de prise de décision du type expert dans le cas de la définition des valeurs du CN qui sont déterminées en prenant comme unité d'analyse les unités géomorphologiques et de paysages correspondants rencontrées dans les sous-bassins (confer tableau I-7). Ces unités d'analyse tiennent mieux compte des caractéristiques du terrain, car elles sont beaucoup plus nombreuses que les quatre HRU (sous-bassins) considérées lors de la modélisation TOLOFI et possèdent une certaine homogénéité quant à la couverture végétale, la géologie, le sol et les processus de formation (origine).

La classification type expert<sup>1</sup> attribue un groupe hydrologique de sol aux différentes unités géomorphologiques du bassin décrites auparavant (confer tableau I-7). Les unités

---

<sup>1</sup> Trois réunions organisées en mars 2006 à l'INIBREH avec la participation de Luis Espinoza, professeur à l'université de Tarija; Oscar Mendez, spécialiste SIG (préfecture de Tarija); Veronica Aranda, pédologue (préfecture de Tarija); Oscar Zarate, modélisation hydrologique, laboratoire d'hydraulique, université de Cochabamba.

géomorphologiques ont été préférées aux unités de la carte des sols, car elles sont plus détaillées dans leur description et tiennent compte de la pente. Le groupe hydrologique défini par la classification type expert est comparé avec celui attribué par le laboratoire d'hydraulique (LH) de l'université de Cochabamba aux mêmes unités géomorphologiques. Le résultat du classement type expert est repris dans le tableau III-22.

**TABLEAU III-22: paysages, unités géomorphologiques et groupes hydrologiques correspondants (source: réunions de mars 2006) – Bassin de la Tolomosa)**

Paysage et éléments lithologiques	N°	Unité géomorphologique (sous-paysage)	Classification groupe hydrologique	
			Expert(1)	LH (2)
Versant glaciaire	1	Cirque et versant rocheux	C-B	B + 2
	2	Complexe glaciaire	B	B
	3	Moraine	B-A	A + 3
Versant avec présence de glacis Eléments quartzeux et gréseux	4	Versant légèrement découpé	B	B
	5	Versant découpé	B-C	B-C
	6	Versant découpé à très découpé	B-C	BC - 1
Versant avec recouvrement du glacis par colluvion (2) Eléments quartzeux, gréseux, cuirasse ferrugineuse	7	Versant découpé à très découpé	B-C	C - 2
Versant à éléments gréseux, argileux et tuf Vallée glaciaire	8	Versant très découpé	C-D	C + 2
	9	Terrasse basse non découpée	B-A	B - 2
	10	Terrasse haute modérément découpée	B	B
Versant à éléments quartzeux et gréseux, conglomérats	11	Versant modérément découpé à découpé	C	C + 1
	12	Versant très escarpé et découpé	C-D	CD
	13	Versant découpé	C-D	CD
	14	Versant découpé à très découpé	C-D	CD - 1
	15	Versant très découpé	C-D	CD - 1
Versant gréseux, schiste, cuirasse ferrugineuse, diamictite	16	Versant légèrement découpé	C-D	CD - 1
	17	Versant modérément découpé	C	CD - 1
	18	Versant modérément découpé à découpé	C-D	D
	19	Versant découpé	C	C-D
	20	Versant très découpé	D	D
	21	Cime et versant légèrement découpés	C-D	C-D

Paysage	N°	Unité géomorphologique (sous-paysage)	Classification groupe hydrologique	
			Expert(1)	LH(2)
Piémont fluvio-glaciaire	22	Vallée étroite modérément escarpée	A-B	A-B
	23	Eventail de terrasses incliné et peu escarpé	A-B	B
	24	Vallée étroite peu inclinée	A-B	B + 1
	25	Eventail peu escarpé de terrasses	B	B
	26	Piémont légèrement incliné	B	B + 1
Piémont alluvial	27	Eventail plat à légèrement incliné	A-B	A
	28	Eventail mal drainé	D	C-D
	29	Eventail légèrement incliné	A-B	A-B
Terrasse alluviale	30	Terrasse moins récente	B-C	B-C
	31	Terrasse récente	A	A
	32	Terrasse basse modérément découpée	A-B	A-B
	33	Terrasse actuelle légèrement découpée	A	A
Cônes et petites vallées avec dépôts fluviatiles et lacustres	34	Vallée découpée à très découpée	B-C	B-C
	35	Vallée découpée	C-B	B-C
	36	Eventail modérément découpé	B-C	B-C
Replat fluvio-lacustre	37	Replat peu incliné	B	B + 2
	38	Replat non découpé	C-B	B + 2
	39	Replat imparfaitement drainé	C	C + 2
	40	Replat légèrement découpé	B-C	B-C
	41	Replat modérément découpé	C-D	C-D
	42	Replat découpé	D	D
	43	Replat très découpé	C	D

(1) Classification type expert; INIBREH, mars 2006

(2) Classification utilisée par le laboratoire d'hydraulique de Cochabamba (LH)

A la lecture du tableau III-22 ci-dessus, on constate que l'attribution des différents groupes hydrologiques aux unités géomorphologiques selon la classification type expert et LH est très proche. La classification du groupe hydrologique la plus précise a été attribuée à chaque unité géomorphologique.

Le tableau III-23 donne l'occupation des terres du bassin versant et les CN correspondants en fonction des quatre groupes hydrologiques (source: Chow, 1964).

**TABLEAU III-23: unité d'occupation des terres, groupe hydrologique et CN correspondant (pente de 5%; condition d'humidité II) (source: Chow, 1964) – Bassin de la Tolomosa)**

Occupation des terres		Mode d'aménagement	Comportement hydrologique	Groupe hydrologique			
Générale	Tolomosa			A	B	C	D
Plantes sarclées	AGRC	En courbe de niveau	Favorable	65	75	82	86
Prairies ou terres de parcours	SPAS(b) PAST(a; b; c)		Défavorable	47	67	81	88
	RNGB; RNGE WPAS; SPAS(a)		Moyen	25	59	75	83
Boqueteaux	FRST		Défavorable	36	60	73	79
Route en dur	URLD WATR			74	84	90	92
Imperméable	Réservoir			100	100	100	100

La classification des prairies naturelles est basée sur la densité du couvert ou le degré de recouvrement, en fonction du mode d'exploitation. Le comportement hydrologique de SPAS(b), PAST, RNGB, RNGE, WPAS et SPAS(a) est déterminé en fonction du degré de protection du sol:

- Degré de protection du sol par la végétation < 50%: comportement hydrologique défavorable (prairies fortement pâturées)
- Degré de protection du sol par la végétation de 50 à 75%: comportement hydrologique moyen (prairies modérément pâturées)

Le boisement dans le bassin est plus du type boqueteau ou bosquet que forêt. Le comportement hydrologique de l'occupation bosquet-sol est considéré dans le bassin comme défavorable, car fortement pâturée (zone ombragée pour le bétail). Du point de vue hydrologique, les rotations agricoles ont été classées entre favorables et défavorables suivant la densité de la couverture du sol. Une rotation défavorable correspond aux cultures sarclées, aux céréales et aux périodes où les sols sont laissés en jachère. Une rotation favorable correspond aux prairies temporaires ou aux fourrages à couverture dense, aux rotations comprenant une forte proportion de légumineuses. De manière générale, l'observation montre que l'occupation agricole des terres a un comportement hydrologique favorable dans le bassin.

Enfin, à chaque unité d'occupation des terres est attribuée une valeur du CN obtenue de la matrice des valeurs du CN en fonction du groupe hydrologique de chaque unité morphologique, du mode d'aménagement et du comportement hydrologique rencontré. Cette matrice se trouve à l'annexe III-2.

### III-5.2 VALEURS DES PARAMETRES

Les valeurs de chaque paramètre restent inchangées pour permettre la comparaison entre les modélisations TOLOFI et TOLOMAT. Seules les valeurs du paramètre CN sont modifiées par sous-bassin et sont reprises dans le tableau III-24.

**TABLEAU III-24: comparaison entre les valeurs du CN<sub>2s</sub> des modélisations TOLOFI (run 6KUL2) et TOLOMAT (run 15KUL2) – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	CN	Bassin	Sous-bassin				Run
			TolomosaA	Mena	Sola	Pinos	
TOLOFI	CN <sub>2s</sub> SWAT	74	73	73	74	74	6KUL2
TOLOMAT	CN <sub>2</sub> matrice	79	81	83	74	80	15 KUL2

### III-5.3 CRITERES STATISTIQUES

La correspondance entre débits journaliers observés et simulés est évaluée grâce aux trois critères statistiques retenus (confer point II-3.5). La comparaison entre les valeurs des critères statistiques des modélisations TOLOMAT et TOLOFI calculées sur la période de 1977 à 1984 pour les phases de calibrage et validation est présentée dans le tableau III-25 (pas de temps journalier).

**TABLEAU III-25: comparaison entre les valeurs des critères statistiques des modélisations TOLOMAT et TOLOFI calculées pour les phases de calibrage et validation sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Critère par phase	TOLOFI	TOLOMAT
<b>Calibrage</b>		
EF (Nash)	0,64	0,52
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,67	0,57
Ecart-type résiduel	6,7 m <sup>3</sup> /s	7,3 m <sup>3</sup> /s
<b>Validation</b>		
EF (Nash)	0,67	0,51
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,74	0,56
Ecart-type résiduel	5,2 m <sup>3</sup> /s	5,7 m <sup>3</sup> /s

On constate que, de manière générale, l'écart entre les données observées et simulées est moindre via la modélisation TOLOFI que via la modélisation TOLOMAT.

### III-5.4 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats de la simulation sont analysés en comparant les débits observés et simulés au niveau annuel, mensuel et journalier.

#### III-5.4.1 BILAN HYDROLOGIQUE

Les résultats concernent l'ensemble des années de calibrage et validation. Le tableau III-26 compare pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs annuelles moyennes simulées des termes du bilan en eau via TOLOFI et TOLOMA par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

**TABLEAU III-26: comparaison entre les termes annuels moyens du bilan en eau des modélisations TOLOFI et TOLOMAT sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
TOLOFI	1.214	771	14	384	398	44	44	442
TOLOMAT	1.214	767	38	360	399	33	33	431

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

On constate que la valeur de l'écoulement total des deux modélisations est assez proche, avec une légère diminution de 3% pour TOLOMAT. L'utilisation des CN de la matrice a transformé la répartition des écoulements. Par rapport à la modélisation TOLOFI, la valeur du paramètre SURF\_Q a presque triplé dans la modélisation TOLOMAT, passant respectivement de 14 mm à 38 mm. L'écoulement de base GW\_Q passe de 44 mm (TOLOFI) à 33 mm (TOLOMAT). Par contre, l'écoulement LAT\_Q a légèrement baissé dans la modélisation TOLOMAT au profit de SURF\_Q, passant de 384 mm à 360 mm. On constate aussi une légère diminution de l'ETR.

Le tableau III-27 présente pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs simulées des termes mensuels moyens du bilan en eau par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

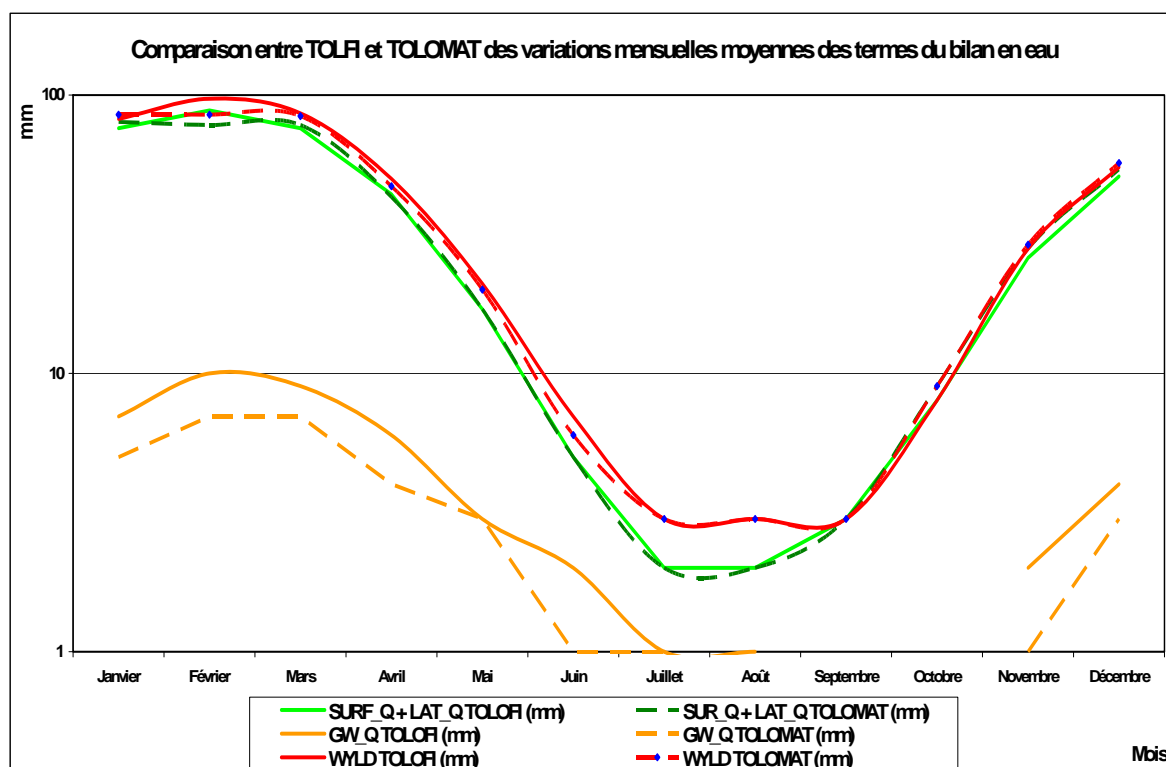
**TABLEAU III-27: résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOMAT sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation. (mm)	ETR (mm)	SURQ (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
Août	15	11	0	2	2	0	0	3
Septembre	13	13	0	3	3	0	0	3
Octobre	64	37	1	7	9	0	1	9
Novembre	146	75	3	25	28	1	3	29
Décembre	213	116	8	47	54	3	6	57
Janvier	265	143	9	71	80	5	10	85
Février	233	142	12	66	78	7	8	85
Mars	190	134	6	72	78	7	4	84
Avril	62	62	0	43	43	4	1	47
Mai	7	21	0	17	17	3	0	20
Juin	1	8	0	5	5	1	0	6
Juillet	5	6	0	2	2	1	0	3
<b>TOTAL</b>	<b>1.214</b>	<b>767</b>	<b>38</b>	<b>360</b>	<b>399</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>431</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Les graphiques de la figure III-47 comparent la variation mensuelle moyenne des précipitations et des termes du bilan en eau simulés entre les modélisations TOLOFI et TOLOMAT de 1977 à 1984. Rappelons que WYLD est la quantité nette totale d'eau quittant l'unité de calcul, ici le bassin versant ( $WYLD = SURF_Q + LAT_Q + GW_Q$ ).

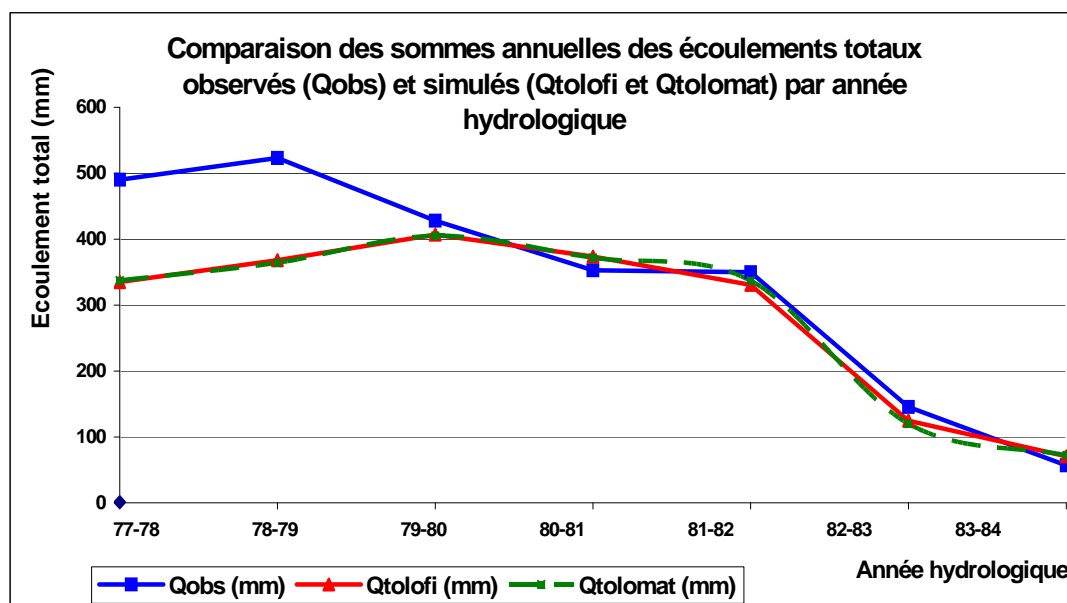


**FIGURE III-47: comparaison entre les modélisations TOLOFI et TOLOMAT des variations mensuelles moyennes des valeurs des termes du bilan en eau sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

On constate notamment que l'écoulement de base simulé via TOLOMAT est plus faible que dans le cas de la modélisation TOLOFI. En conséquence, l'écart s'accroît entre l'amplitude des courbes de récession des crues issues des données observées et simulées via TOLOMAT.

### III-5.4.2 HYDROGRAMMES ANNUELS

L'écoulement annuel total observé ( $Q_{obs}$ ) et simulé ( $Q_{tolofi}$  et  $Q_{tolomat}$ ) est donné par année hydrologique (77-78; 78-79; 79-80; 80-81; 81-82; 82-83; 83-84) sur le graphique de la figure III-48. L'année 76-77, rappelons-le, est l'année de mise en régime.



**FIGURE III-48: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$  et  $Q_{tolomat}$ ) par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Comme rencontré précédemment, on constate une sous-estimation marquée des écoulements simulés  $Q_{tolomat}$  par rapport aux écoulements observés  $Q_{obs}$  durant les deux premières années hydrologiques (1977-78 et 1978-79).

### III-5.4.3 HISTOGRAMME DES PRÉCIPITATIONS ET HYDROGRAMMES DES ECOULEMENTS

Le graphique de la figure III-49 compare les hydrogrammes partiels via TOLOMAT et TOLOFI du total mensuel des débits disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$  et  $Q_{tolomat}$ ) pour les mêmes dates avec l'histogramme des précipitations mensuelles.

On constate que l'allure de la variation saisonnière de l'hydrogramme de la modélisation TOLOMAT est très similaire à celle de l'hydrogramme de la modélisation TOLOFI.

### III-5.4.4 HYDROGRAMMES DES ECOULEMENTS JOURNALIERS

Les graphiques des figures III-50 et III-51 comparent les hydrogrammes des écoulements journaliers simulés via TOLOFI et TOLOMAT avec l'hydrogramme des valeurs observées pour les phases de calibrage et validation.

L'analyse des hydrogrammes obtenus montre que, en augmentant la valeur des CN dans les sous-bassins (et donc le ruissellement), les débits de crue sont beaucoup mieux marqués par la modélisation TOLOMAT que par la modélisation TOLOFI et rencontrent mieux les pointes de crue de l'hydrogramme des données observées.

### III-5.5 RENDEMENT EN SEDIMENT

La valeur simulée du rendement moyen annuel en sédiment (SYLD) pour le bassin et par sous-bassin est présentée dans le tableau III-28.

**TABLEAU III-28: rendement annuel moyen en sédiment SYLD estimé par sous-bassin via la modélisation TOLOMAT (run 6KUL, partie 2) sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin / HRU	SYLD annuel (t/ha)
TolomosaA	2,6
Mena	200,5
Sola	1,6
Pinos	3,8
Bassin versant	32,8

(du fichier TXTINOUT, output SB)

La valeur très élevée du rendement annuel moyen en sédiment du sous-bassin Mena est difficilement explicable.

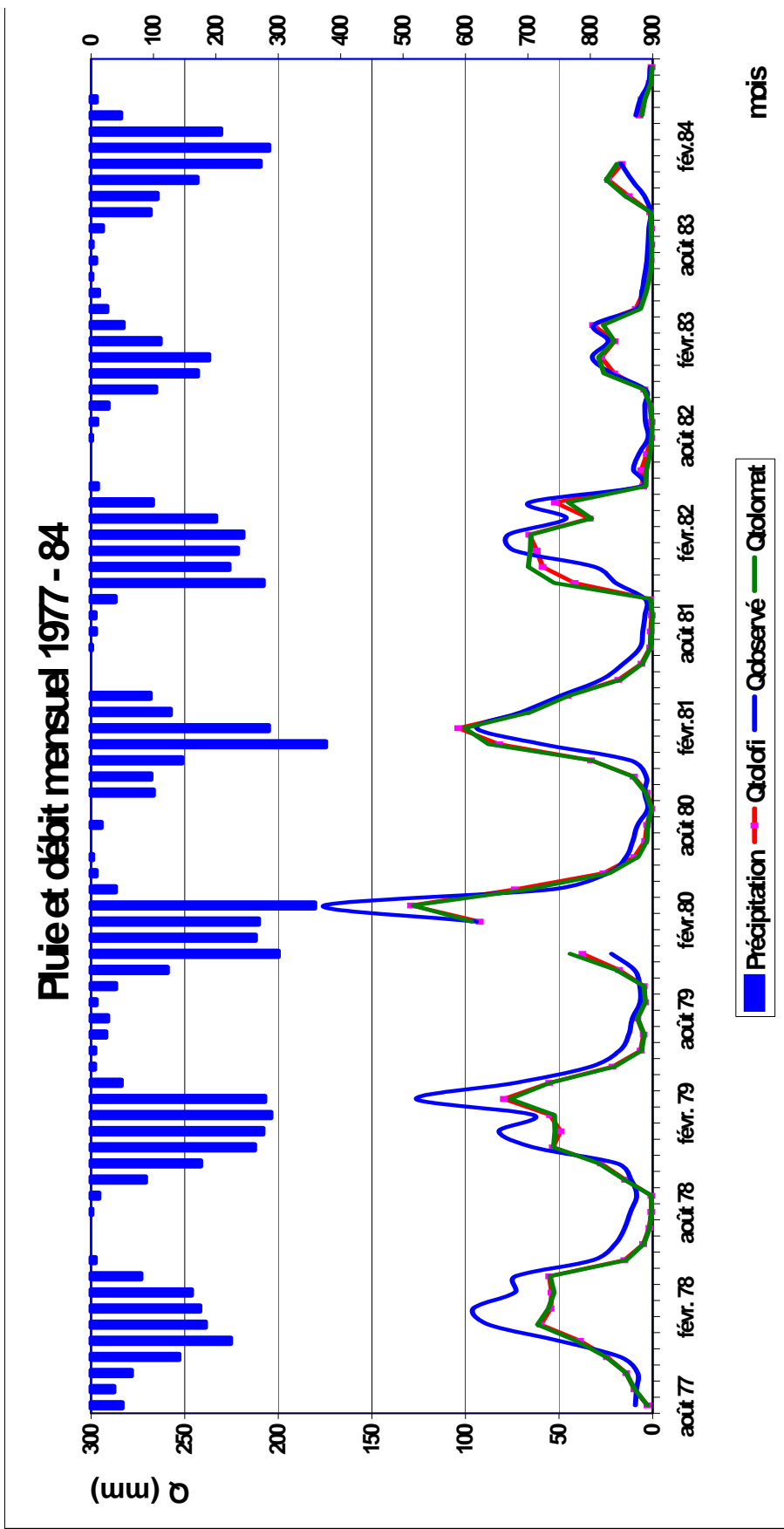


FIGURE III-49: évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{totomat}$  et  $Q_{dolomat}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa

### Comparaison entre les écoulements observés et simulés (Qtolofi et Qtolomat) (1977 - 81)

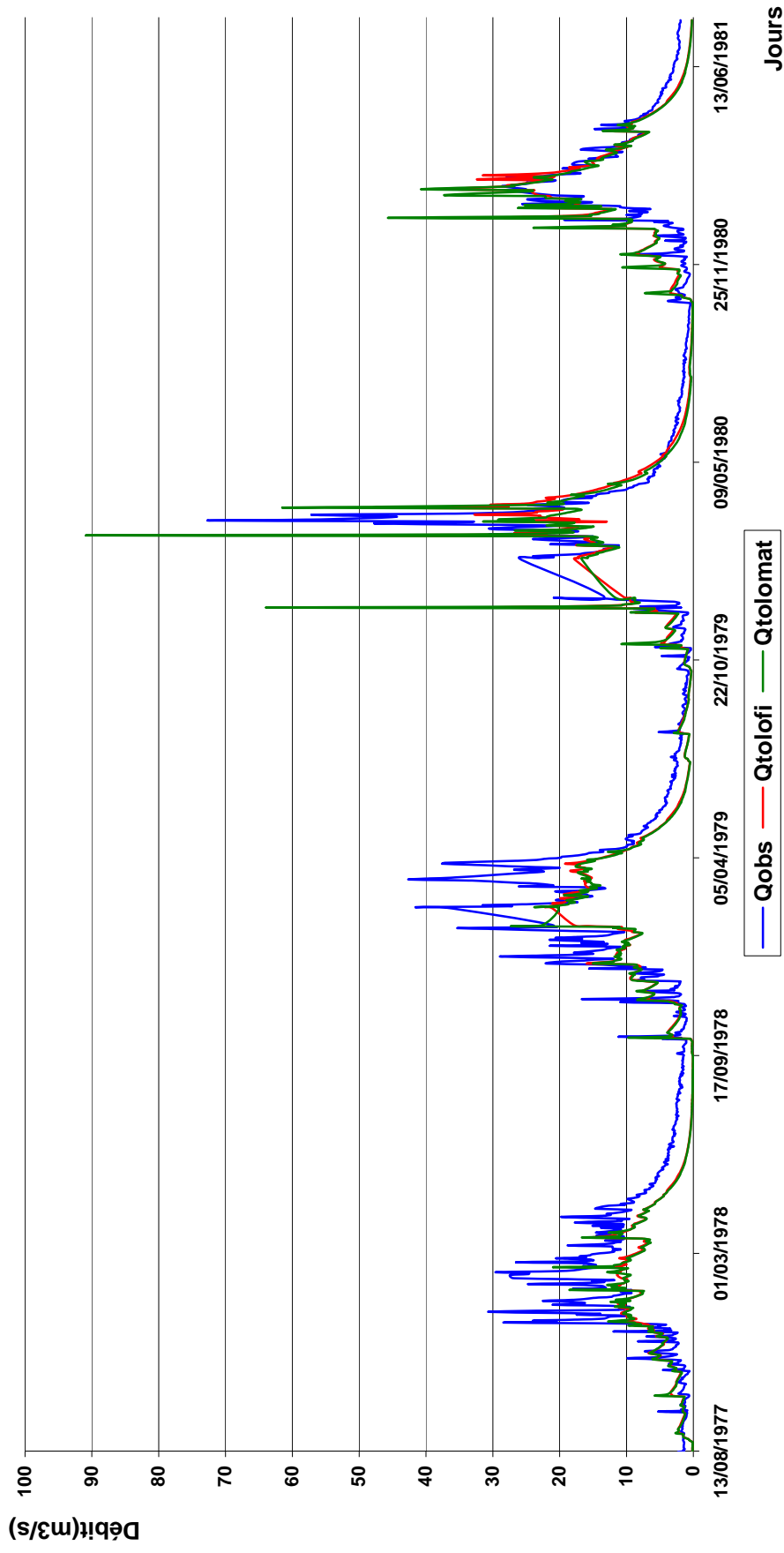


FIGURE III-50: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$  et  $Q_{tolomata}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1981. Station de San Jacinto – Bassin de la Tolomosa

### Comparaison entre les écoulements observés et simulés (Qtolofi et Qtolomat) (1981 - 84)

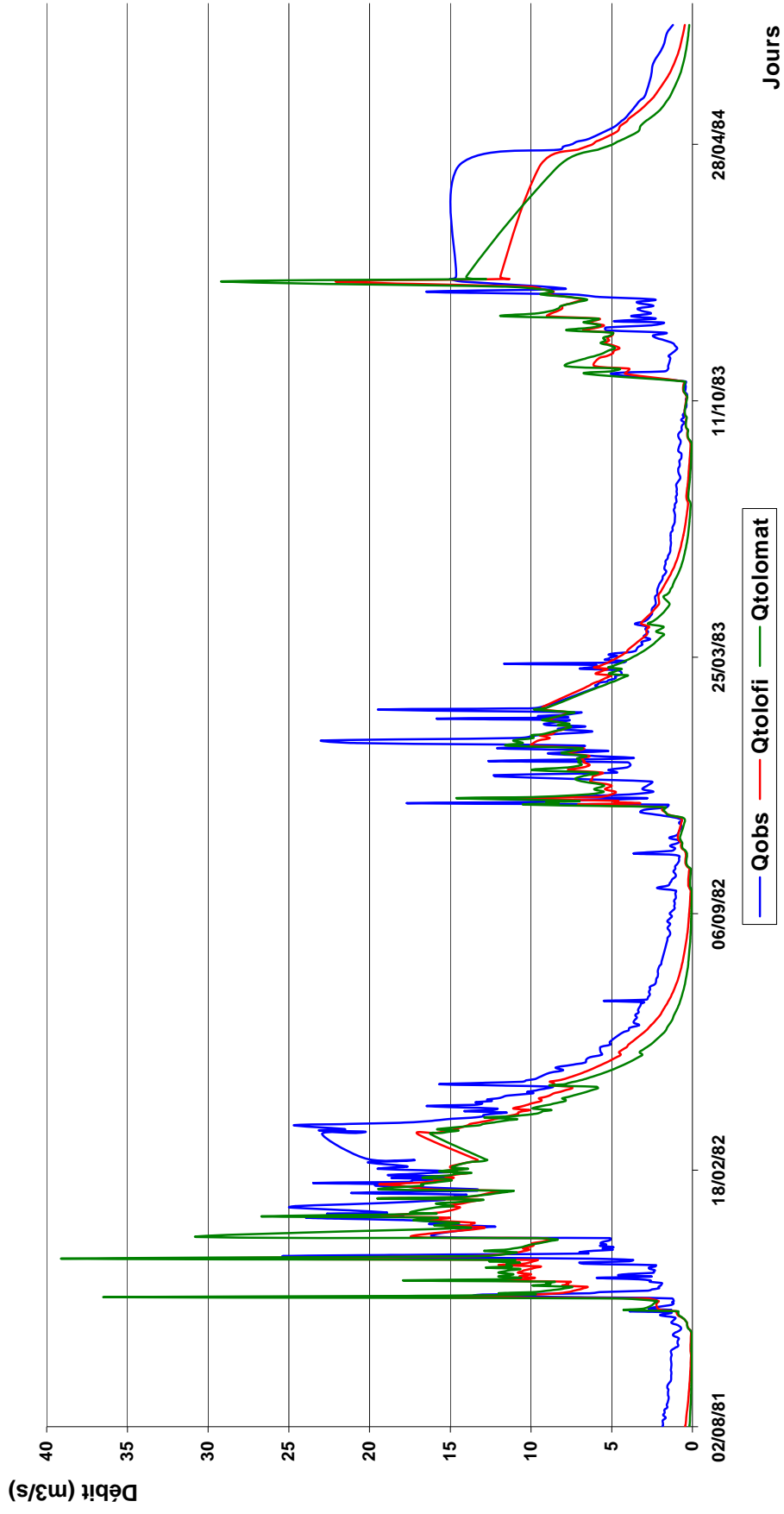


FIGURE III-51: évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$  et  $Q_{tolomat}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1984. Station de San Jacinto – Bassin de la Tolomosa

### III-5.6 CONCLUSIONS DE LA MODELISATION

L'analyse des performances des deux modélisations montre que l'écart entre les données observées et simulées est majeur via TOLOMAT. L'observation visuelle des hydrogrammes indique que l'utilisation des CN déterminés par la matrice rend en général mieux compte des débits de crue.

### III-6 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLO3A

#### III-6.1 DISCRETISATION TEMPORELLE

On appelle TOLO3A la modélisation qui décrit la situation actuelle du bilan en eau du bassin versant sur une période de trois années divisée en une phase de calibrage (août 77 à juillet 78) et de validation (août 78 à juillet 80). Cette période de trois années est choisie, car elle possède les données observées les plus nombreuses.

Le but de cette modélisation est de tenter d'améliorer les bilans en eau annuels et mensuels simulés, de mieux rendre compte dans les hydrogrammes simulés des pointes de débit observées et, enfin, de diminuer les résidus entre données observées et simulées.

#### III-6.2 DISCRETISATION SPATIALE

La discrétisation spatiale du bassin versant se limite aux mêmes quatre HRU définies précédemment.

#### III-6.3 PHASE DE CALIBRAGE

##### III-6.3.1 VALEURS DES PARAMETRES

Comme pour les autres modélisations, les CN n'ont pas été calibrés. La modélisation utilise les CN<sub>2s</sub> issus de la matrice d'experts ainsi que ceux calculés par SWAT. Les valeurs finales des vingt-cinq variables issues soit du calibrage, soit des informations de terrain ou, enfin, des valeurs par défaut du modèle sont reprises dans le tableau III-29.

**TABLEAU III-29: valeurs finales des paramètres de la modélisation TOLO3A obtenues par calibrage (1), des données de terrain (2) ou des valeurs par défaut (3) du modèle (run 98) - Bassin de la Tolomosa**

Fichier	Paramètre	Unité	Valeur (*)	Valeur finale			
				Tolomosa	Mena	Sola	Pinos
<b>Paramètres liés aux processus d'évapotranspiration</b>							
.hru	ESCO (1)	--	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98
.hru	EPCO (1)	--	1,0	0,06	0,06	0,06	0,06
.hru	CANMX (2)	mm	0,0	2	2	2	2
.gw	GW_REVAP (1)	--	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
.gw	REVAPMN (1)	mm	1,0	20	20	20	20
<b>Paramètres liés aux processus des écoulements</b>							
.mgt	CN <sub>2</sub> matrice (2)	--		81	83	74	80
	CN <sub>2s</sub> SWAT	--		73	73	74	74
.mgt	USLE_P (3)	--	1,0	1	1	0,9	1
Crop.dat	USLE_C (3)	--	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
.hru	OV_N (3)	--	0,15	0,15	0,15	0,25	0,25
.hru	SLSUBBSN (1)	m	10	30	10	10	10
.hru	SLOPE) (2)	m/m	0,10	0,18	0,16	0,41	0,25
<b>Paramètres liés aux processus de transfert des écoulements</b>							
.sub	CH_K1 (3)	mm/h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
.sub	CH_N1 (2)	--	0,014	0,04	0,04	0,04	0,04
.rte	CH_N2 (2)	--	0,014	0,035	0,03	0,05	0,03
.rte	CH_K2 (2)	mm/r	0,5	35	12	12	12
.rte	CH_EROD	--	0	0	0	0	0

Fichier	Paramètre	Unité	Valeur (*)	Valeur finale			
				Tolomosa	Mena	Sola	Pinos
<b>Paramètres liés aux processus de l'eau dans le sol</b>							
.sol	SOL_AWC (2)	mm H <sub>2</sub> O /mm sol	0,12	0,35 0,29 0,29	0,18 0,18	0,35 0,29 0,29	0,35 0,29 0,29
.sol	SOL_K (2)	mm/h	11,0	30 70 30	30 130	30 50 30	30 70 30
.sol	USLE_K (1)	--	0,25	0,6	0,6	0,4	0,4
.gw	GW_DELAY (1)	jour	31	50	50	50	50
.gw	ALPHA_BF (1)	jour	0,048	0,7	0,7	0,7	0,7
.gw	GWQMN (1)	mm	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5
.gw	RCHRG_DP (3)	--	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
.gw	SHALLST (1)	mm	0,5	20	20	20	20
.hru	LAT_TTIME (1)	jour	0	15	15	15	15

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) Valeur obtenue par calibrage

(2) Valeur obtenue à partir des données de terrain ou littérature

(3) Valeur par défaut

(\*) Initiales lors du calibrage ou par défaut

On constate que, durant la phase de calibrage, les valeurs de certains paramètres ont été légèrement modifiées pour permettre d'atteindre une meilleure efficacité EF (ESCO; REVAPMN; SLSUBSN; LAT\_TTIME).

### III-6.3.2 CRITERES STATISTIQUES

#### III-6.3.2.1 Coefficients d'efficacité et de détermination et écart-type

Les valeurs des trois critères statistiques utilisés pour mesurer la performance de la modélisation TOLO3A pour la phase de calibrage sont données dans le tableau III-30 (pas de temps journalier).

**TABLEAU III-30: valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLO3A calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78 - Bassin de la Tolomosa**

Critère statistique	Valeur (CN <sub>2</sub> matrice)	Valeur (CN <sub>2s</sub> SWAT)
EF (efficacité de Nash et Sutcliffe)	0,72	0,74
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,63	0,66
Ecart-type résiduel	3,1 m <sup>3</sup> /s	3,1 m <sup>3</sup> /s

Les valeurs du coefficient d'efficacité EF (0,72 et 0,74) et du coefficient de détermination (0,63 et 0,66) permettent, pour les conditions locales, de considérer la modélisation comme apte à représenter le comportement hydrologique du bassin versant de la Tolomosa (Gassman et al., 2007; Motovilov et al., 1999 cités par Watson et al., 2005). L'écart-type résiduel est de 3,1 m<sup>3</sup>/s.

On constate aussi que la modélisation utilisant le CN issu de la matrice présente une valeur du coefficient de Nash et R<sup>2</sup> légèrement inférieure à celle obtenue via la modélisation basée sur les CN SWAT.

#### III-6.3.2.2 Régression des moindres carrés

La régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs (en mm) des débits journaliers observés (Q<sub>obs</sub>) et simulés (Q<sub>tolc3A</sub>) aux dates correspondantes est présentée sur les graphiques de la figure III-52 et III-53 pour la phase de calibrage.

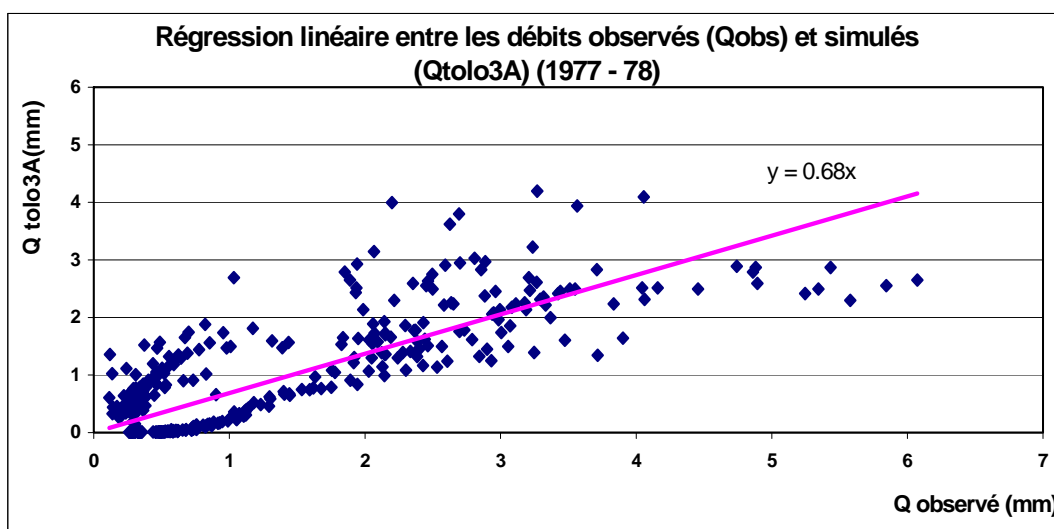


FIGURE III-52: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{\text{tolo3A}}$ ) et observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78 (run 98 avec  $\text{CN}_2$  matrice) - Bassin de la Tolomosa

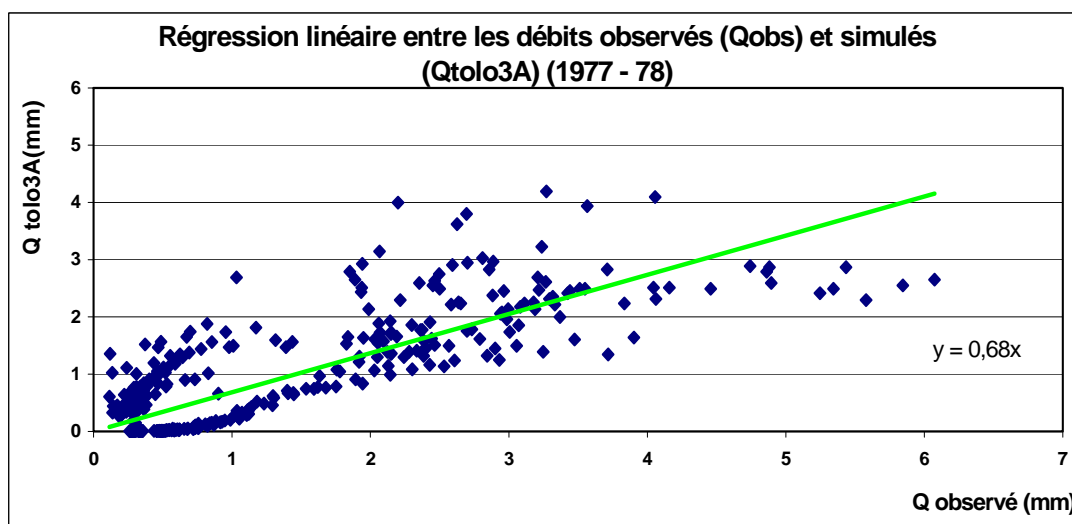


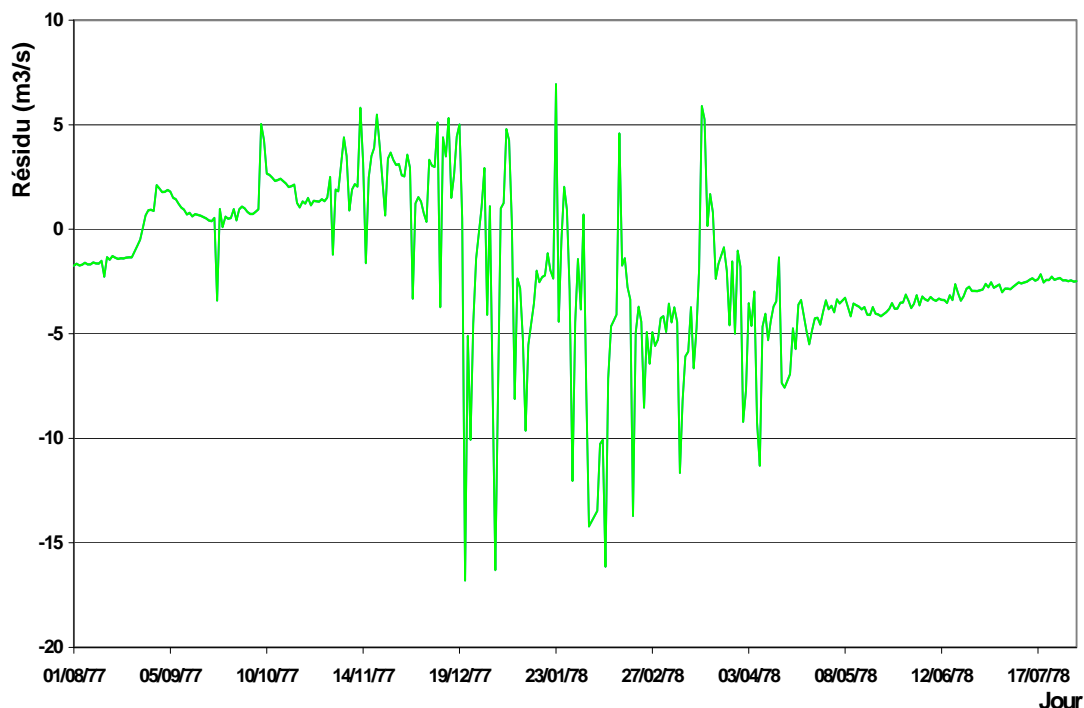
FIGURE III-53: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{\text{tolo3A}}$ ) et observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 78 (run 103 avec  $\text{CN}_{2\text{S}}$  SWAT) - Bassin de la Tolomosa

Les coefficients de régression ont une valeur respective de 0,68. On constate donc une bonne corrélation entre les valeurs des données observées et simulées, malgré une certaine tendance à la sous-estimation des données simulées par rapport aux valeurs historiques.

Remarquons la différence d'ordre de grandeur entre les données simulées et mesurées. Outre quelques points fortement erratiques aux débits plus faibles, on observe que la sous-estimation des débits simulés par rapport aux débits observés est accentuée pour les débits élevés qui tendent vers un palier.

### III-6.3.2.3 Courbe des résidus

L'évolution de la différence entre les débits observés  $Q_{\text{obs}}$  et simulés  $Q_{\text{tolo3A}}$  (résidus) est donnée sur le graphique de la figure III-54.



**FIGURE III-54: résidus en m<sup>3</sup>/s pour la phase et période de calibrage de la modélisation TOLO3A (run 103 avec CN SWAT) – Bassin de la Tolomosa**

L'examen du graphique montre que l'amplitude de la variation des résidus varie dans une fourchette plus restreinte que celle obtenue via la modélisation TOLOFI. De manière générale, les résidus sont les plus importants durant la période pluvieuse de décembre à avril. L'écart-type résiduel de 3,1 m<sup>3</sup>/s multiplié par deux, il donne l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des résidus.

### III-6.3.3 RESULTATS DE LA PHASE DE CALIBRAGE

Les valeurs estimées des termes du bilan en eau de la phase de calibrage de la modélisation TOLO3A sont principalement extraites des tableaux des fichiers TXTINOUT (*output* STD) et WATOUT de l'interface AvSWAT. Puisque chaque sous-bassin correspond à une HRU dans la modélisation TOLO3A, les résultats par HRU correspondent à ceux obtenus par sous-bassin. Comme les deux simulations ont des résultats pratiquement identiques, par la suite seuls seront analysés ceux de la modélisation utilisant le CN SWAT pour permettre la comparaison avec la modélisation TOLOFI.

Le tableau III-31 présente, globalement pour le bassin versant, les résultats de calibrage de la simulation des écoulements annuels globaux pour l'année hydrologique 1977-78 de la modélisation TOLO3A.

**TABLEAU III-31: résultats de la phase de calibrage de la simulation TOLO3A des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période 1977-78 (run 103) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)
77-78	1.120	715	19	376	395	8	8

Le tableau III-32 présente, globalement pour le bassin versant, les résultats de calibrage de la simulation des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1978 de la modélisation TOLO3A.

**TABLEAU III-32: résultats de la phase de calibrage de la simulation TOLO3A des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1978 (run 103) – Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)
Août	50	16	0	4	4	0	0
Septembre	36	34	0	14	14	0	0
Octobre	65	51	0	20	20	0	0
Novembre	141	67	0	36	36	0	0
Décembre	223	112	5	57	62	1	3
Janvier	183	115	5	73	78	2	2
Février	174	117	5	66	71	2	3
Mars	161	121	2	55	57	2	0
Avril	80	55	0	37	37	1	0
Mai	7	19	0	10	10	1	0
Juin	0	5	0	1	1	0	0
Juillet	0	4	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>1.120</b>	<b>715</b>	<b>18</b>	<b>376</b>	<b>394</b>	<b>8</b>	<b>8</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

#### III-6.3.4 EVALUATION DES PERFORMANCES DU CALIBRAGE

L'analyse porte sur la comparaison entre les résultats de la simulation et les données observées disponibles. Rappelons que les observations journalières ne sont pas continues. Comme la comparaison des bilans ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observation, les sommes suivantes correspondent alors à la somme annuelle ou mensuelle jour à jour, uniquement lorsqu'une donnée observée correspond à une donnée simulée.

##### III-6.3.4.1 Sommes annuelles des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par SWAT via TOLO3A est donnée pour l'année hydrologique 1977-78 dans le tableau III-33. Comme précitée, l'année 76-77 de mise en régime n'est pas reprise ici.

**TABLEAU III-33: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par année hydrologique pour la phase de calibrage sur la période de 1977-78 – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	Q observé (mm)	Q simulé (mm)
TOLO3A	490	371

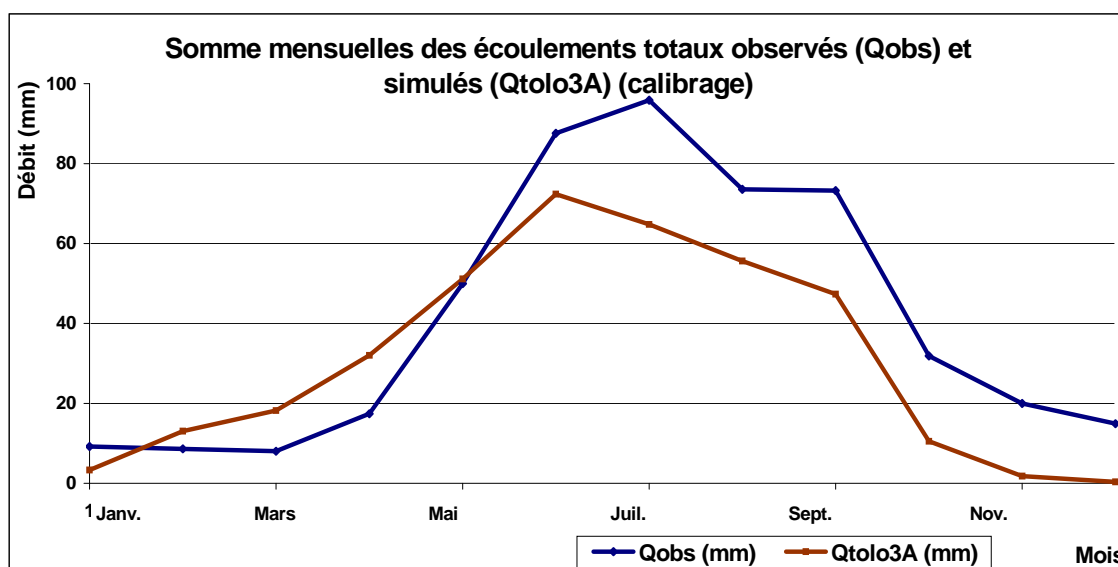
On constate que la phase de calibrage sous-estime les écoulements simulés par rapport aux écoulements observés, mais dans une moindre mesure que les modélisations précédentes.

##### III-6.3.4.2 Sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tol03A}$ ) via TOLO3A aux dates correspondantes est donnée pour la phase de calibrage sur la période de 77-78 dans le tableau III-34 et sur le graphique de la figure III-55. Comme précitée, l'année de mise en régime n'est pas reprise ici.

**TABLEAU III-34: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Q observé (mm)	Q tolo3A (mm)
Août	9	3
Septembre	9	13
Octobre	8	18
Novembre	17	32
Décembre	50	53
Janvier	88	73
Février	96	65
Mars	74	55
Avril	73	46
Mai	32	10
Juin	20	2
Juillet	15	0
<b>TOTAL</b>	<b>490</b>	<b>371</b>



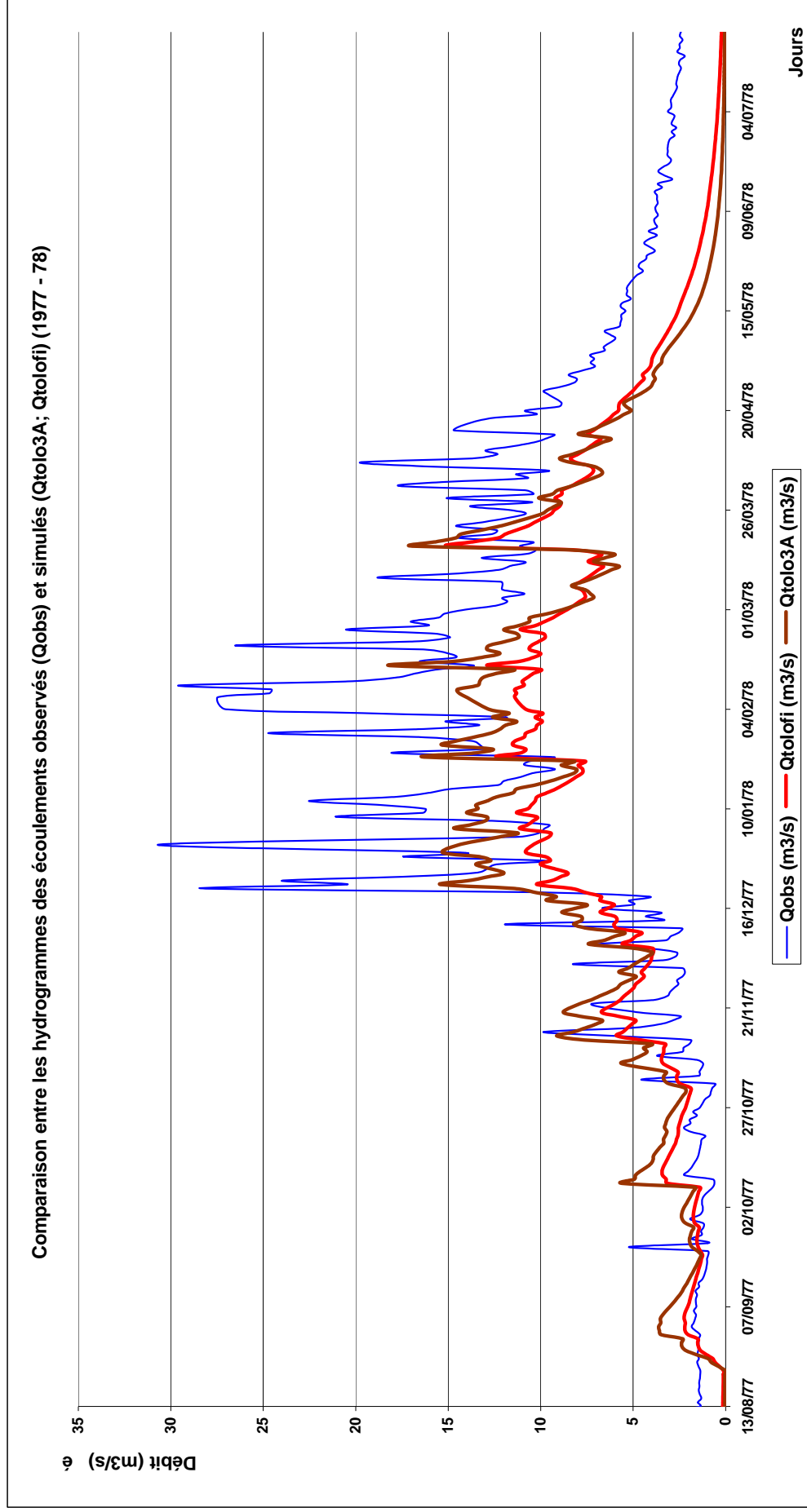
**FIGURE III-55: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage (run 103) - Bassin de la Tolomosa**

#### III-6.3.4.3 Ecoulements journaliers

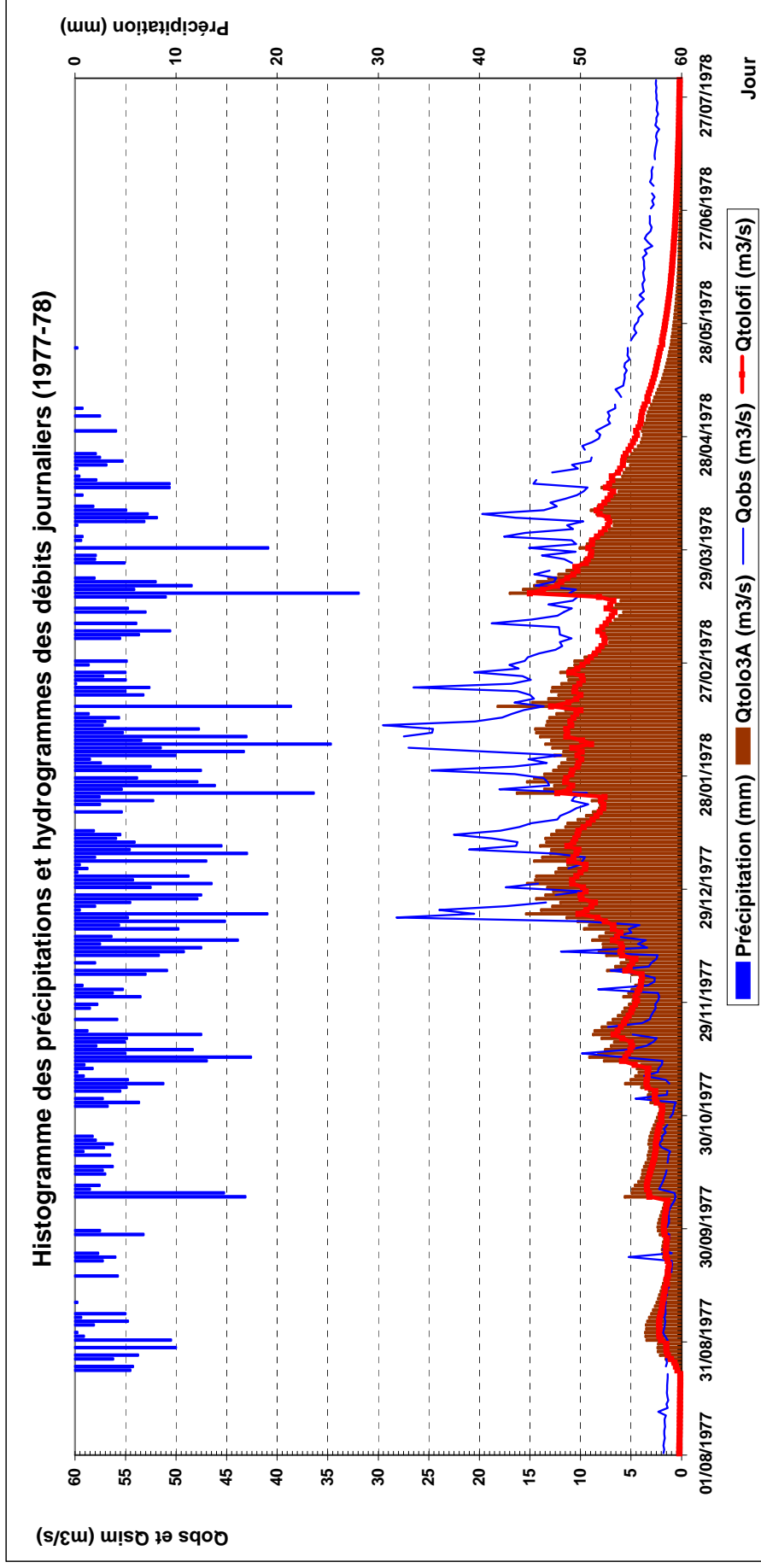
L'évolution des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolo3i}$ ) est comparée aux dates correspondantes pour la phase et période de calibrage (1977-78) sur le graphique de la figure III-56. L'analyse de l'hydrogramme des débits journaliers simulés via TOLO3A montre une amélioration sensible par rapport à la modélisation TOLOFI (première année uniquement) de la corrélation entre les données observées et simulées, y compris pour les débits de pointe.

#### III-6.3.4.4 Histogramme des précipitations et hydrogrammes des écoulements

Le graphique de la figure III-57 compare, par année hydrologique, les débits journaliers disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolo3i}$ ) par le modèle en regard des valeurs journalières des précipitations correspondantes. On remarquera que, pour les mêmes dates, il n'existe pas toujours de données observées.



**FIGURE III-56:** évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolofi}$ ) en  $m^3/s$  sur la période d'août 77 à juillet 78. Station de San Jacinto - Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-57:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ;  $Q_{tolo3A}$ ) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1978 – Bassin de la Tolomosa

On constate une meilleure corrélation entre les valeurs des pluies journalières de l'histogramme et les débits de pointe simulés via TOLO3A qu'entre les valeurs des pluies journalières de l'histogramme et les débits de pointe simulés simulés via TOLOFI.

### III-6.4 PHASE DE VALIDATION

#### III-6.4.1 CRITERES STATISTIQUES

##### III-6.4.1.1 Coefficients d'efficience et de détermination et écart-type

Les valeurs des trois critères statistiques utilisés pour évaluer la performance de la modélisation TOLO3A pour la phase de validation (CN<sub>2</sub> matrice et CN<sub>2s</sub> SWAT) sur la période d'août 1978 à juillet 1980 sont données dans le tableau III-35 (pas de temps journalier).

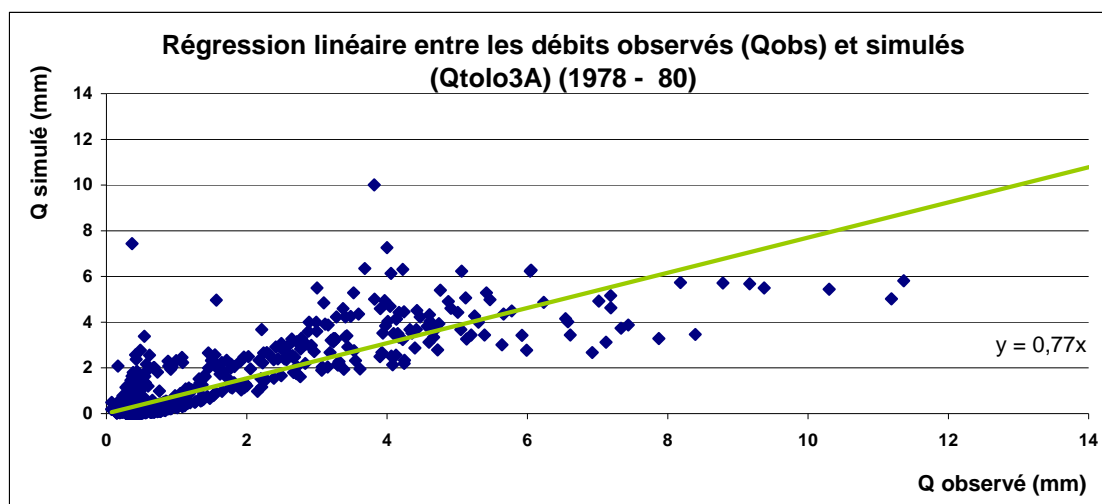
**TABLEAU III-35: valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLO3A calculées pour la phase de validation (run 103) - Bassin de la Tolomosa**

Critère statistique	Valeur (CN <sub>2</sub> matrice)	Valeur (CN <sub>2s</sub> SWAT)
EF (efficience de Nash et Sutcliffe)	0,53	0,67
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,53	0,64
Ecart-type résiduel	7,0 m <sup>3</sup> /s	6,5 m <sup>3</sup> /s

En comparant les valeurs des critères statistiques obtenues à la phase de validation, on constate que la performance de la modélisation via TOLO3A avec les CN calculés par SWAT est plus robuste que celle dont les valeurs des CN proviennent de la matrice. Vu la dégradation du critère de Nash utilisant les CN de la matrice, seuls seront analysés par la suite les résultats de la modélisation utilisant le CN SWAT, ce qui permettra également la comparaison avec la modélisation TOLOFI.

##### III-6.4.1.2 Régression des moindres carrés

La régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs (en mm) des débits journaliers observés (Q<sub>obs</sub>) et simulés (Q<sub>tolo3A</sub>) aux dates correspondantes est présentée sur le graphique de la figure III-58 pour la phase de validation sur la période d'août 1978 à juillet 1980 (CN<sub>2s</sub> SWAT).



**FIGURE III-58: régression linéaire entre les débits journaliers observés (Q<sub>obs</sub>) et simulés (Q<sub>tolo3A</sub> avec CN<sub>2s</sub> SWAT) pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa**

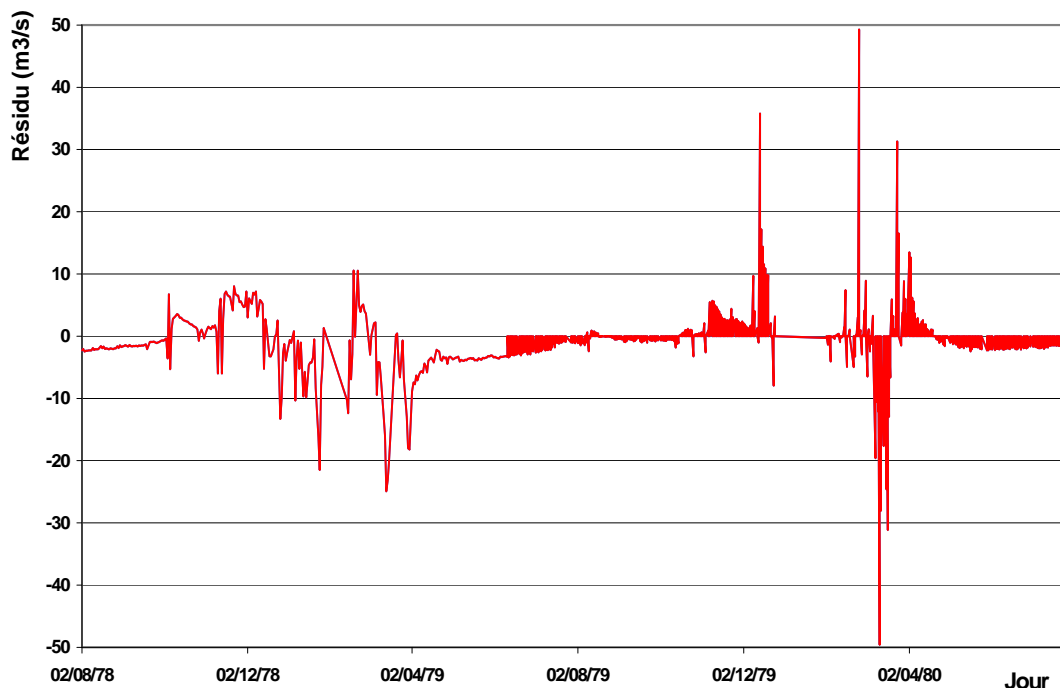
Outre quelques points fortement erratiques aux débits faibles, l'analyse de la régression entre les valeurs des débits journaliers simulés et observés aux dates correspondantes pour la phase de validation montre une corrélation acceptable (R<sup>2</sup> = 0,77). La valeur du coefficient angulaire de la droite

de régression indique une sous-estimation des débits simulés par rapport aux débits observés, s'accroissant pour les débits élevés qui tendent vers un palier.

Les observations supérieures à 9 mm correspondent pour la plupart aux pointes de débit observées entre les 8 et 19 mars 1980 (confer annexe II-1).

### III-6.4.1.3 Evolution des résidus

L'évolution de la différence en  $m^3/s$  entre les débits observés  $Q_{obs}$  et simulés  $Q_{tolo3A}$  (résidu) est donnée sur le graphique de la figure III-59 (CN<sub>2S</sub> SWAT).



**FIGURE III-59: résidus en  $m^3/s$  pour la phase de validation de la modélisation TOLO3A (CN<sub>2S</sub> SWAT) – Bassin de la Tolomosa**

L'examen du graphique montre que les résidus sont les plus importants durant l'année hydrologique 1979-80 et durant chaque période pluvieuse (décembre à avril). De plus, l'amplitude des résidus entre les débits observés  $Q_{obs}$  et simulés  $Q_{tolo3A}$  varient dans une fourchette de  $-50 m^3/s$  à  $+ 50 m^3/s$ . L'écart-type résiduel de  $6,5 m^3/s$  multiplié par deux, il donne l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des résidus.

### III-6.4.2 RESULTATS DE LA PHASE DE VALIDATION

Le tableau III-36 présente, globalement pour le bassin versant, les valeurs respectives des écoulements simulés annuels par année hydrologique sur la période de 1978 à 1980.

**TABLEAU III-36: résultats de validation de la simulation via TOLO3A des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période 1978–80 (run 103) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
78-79	1.464	863	569	13	13	581
79-80	1.497	837	643	19	20	662
<b>Moyenne</b>	<b>1.481</b>	<b>850</b>	<b>606</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>623</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Le tableau III-37 présente, globalement pour le bassin versant, les résultats de la simulation des écoulements mensuels moyens de la phase de validation sur la période de 1978 à 1980 de la modélisation TOLO3A.

**TABLEAU III-37: résultats de validation de la simulation TOLO3A des écoulements mensuels moyens sur la période de 1978 à 1980 (run 103) - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q +LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
Août	14	13	5	0	0	5
Septembre	10	11	2	0	0	2
Octobre	63	42	15	0	0	15
Novembre	149	76	39	0	1	39
Décembre	281	125	84	1	4	86
Janvier	301	148	117	2	4	120
Février	278	140	135	3	4	138
Mars	318	176	138	4	4	141
Avril	44	73	55	3	0	57
Mai	7	24	12	1	0	14
Juin	4	11	2	1	0	3
Juillet	12	11	3	0	0	3
<b>TOTAL</b>	<b>1.481</b>	<b>850</b>	<b>606</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>623</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

### III-6.4.3 EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA VALIDATION

L'analyse porte sur la comparaison entre les résultats de la simulation et les données observées disponibles. Rappelons que les observations journalières ne sont pas continues, bien qu'elles soient beaucoup plus nombreuses que pour la validation des modélisations précédentes (TOLOFI et TOLOMAT). Comme la comparaison des bilans ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observation, les sommes suivantes correspondent à la somme annuelle ou mensuelle jour à jour, uniquement lorsqu'une donnée observée correspond à une donnée simulée.

#### III-6.4.3.1 Sommes annuelles des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) via TOLO3A est montrée par année hydrologique dans le tableau III-38.

**TABLEAU III-38: somme annuelle des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation**

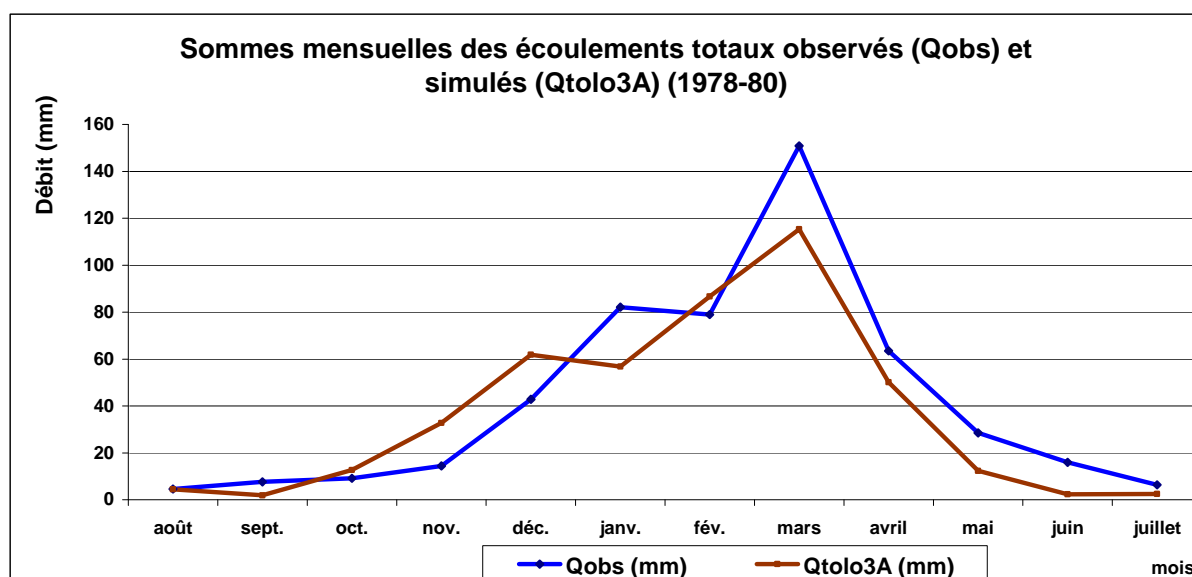
Année hydrologique	Q observé (mm)	Q tolo3A (mm)
78-79	523	400
79-80	428	422

#### III-6.4.3.2 Sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) via TOLO3A aux dates correspondantes est donnée pour la phase de validation par année hydrologique dans le tableau III-39 et sur le graphique de la figure III-60.

**TABLEAU III-39: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Q observé (mm)	Q tolo3A (mm)
Août	5	4
Septembre	8	2
Octobre	9	13
Novembre	14	33
Décembre	43	62
Janvier	82	57
Février	79	87
Mars	151	115
Avril	63	50
Mai	28	12
Juin	16	2
Juillet	6	2
<b>TOTAL</b>	<b>550</b>	<b>440</b>



**FIGURE III-60: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa**

#### **III-6.4.3.3 Ecoulements journaliers**

L'évolution des débits journaliers historiques ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolo3i}$ ) est comparée à la figure III-61 aux dates correspondantes de la phase et période de validation (1978–80).

L'observation de l'hydrogramme de la modélisation TOLO3A sur la période de validation montre un bon comportement des fluctuations saisonnières. L'allure générale de l'hydrogramme saisonnier simulé est semblable à celle de l'hydrogramme observé. On constate aussi que les débits de pointe et les amplitudes sont en général mieux rendus par la modélisation TOLO3A que via TOLOFI.

#### **III-6.4.3.4 Histogramme des précipitations journalières et hydrogrammes des écoulements**

Les figures III-62 et III-63 comparent les débits journaliers disponibles ( $Q_{obs}$ ) et l'ensemble des débits simulés<sup>1</sup> ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolo3i}$ ) en regard des valeurs journalières de l'historique des précipitations correspondantes. Comme pour les autres modélisations, on remarquera que, pour les mêmes dates, il n'existe pas toujours une donnée observée.

<sup>1</sup> Les données simulées proviennent du fichier WATOUT non épuré

Comparaison entre les hydrogrammes des écoulements observés et simulés (Qtolofi, Qtolo3A, Qtolomat) (1978 - 80)

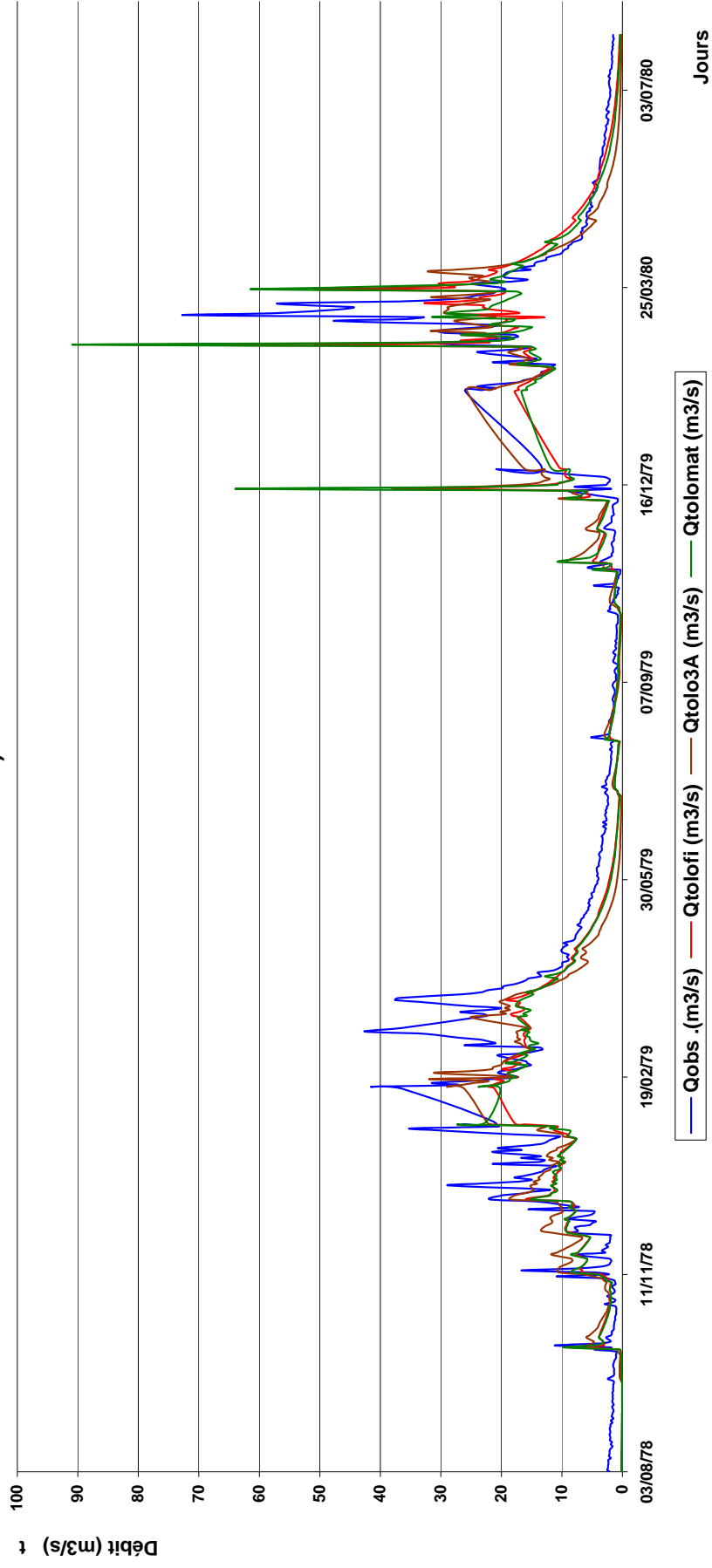
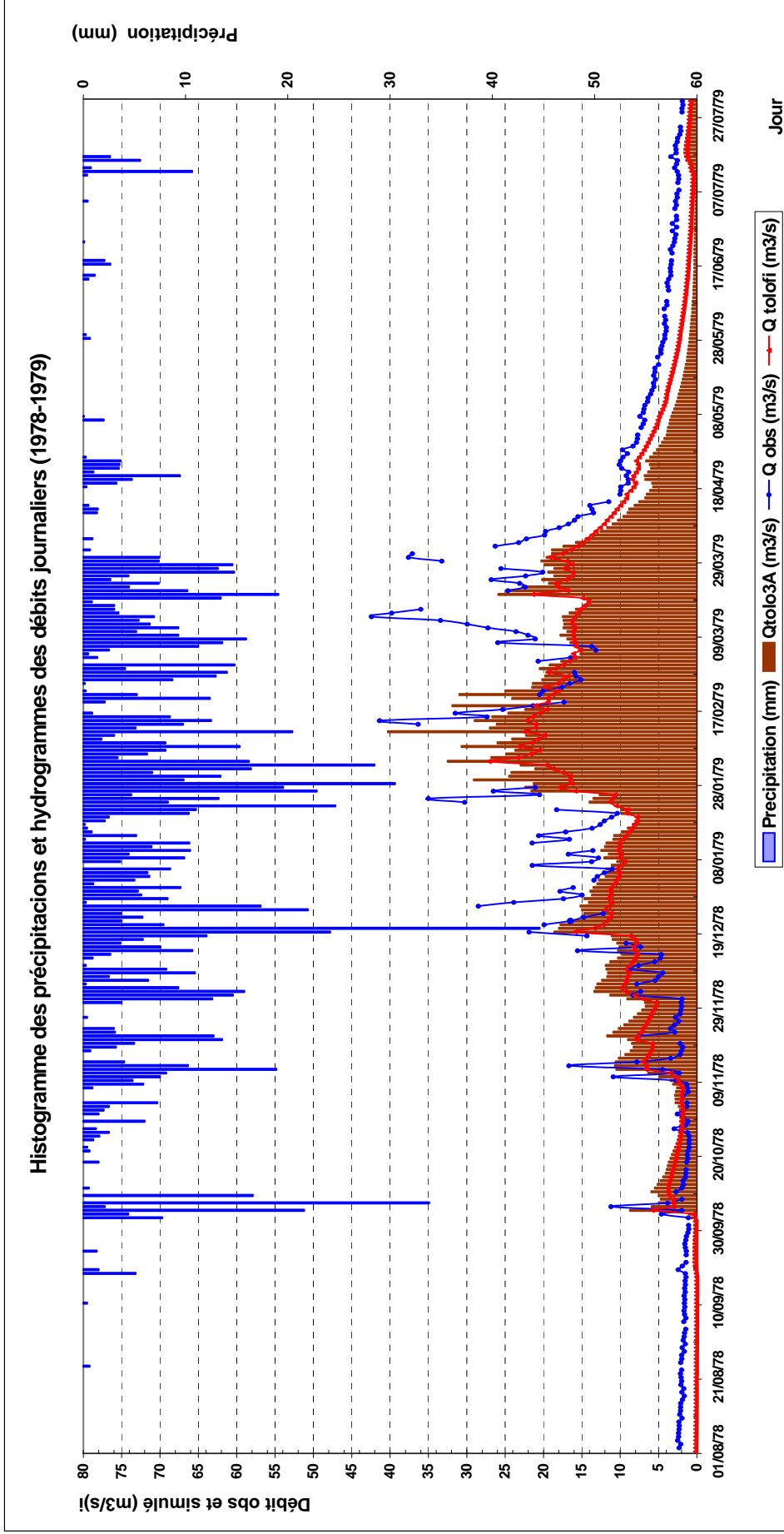
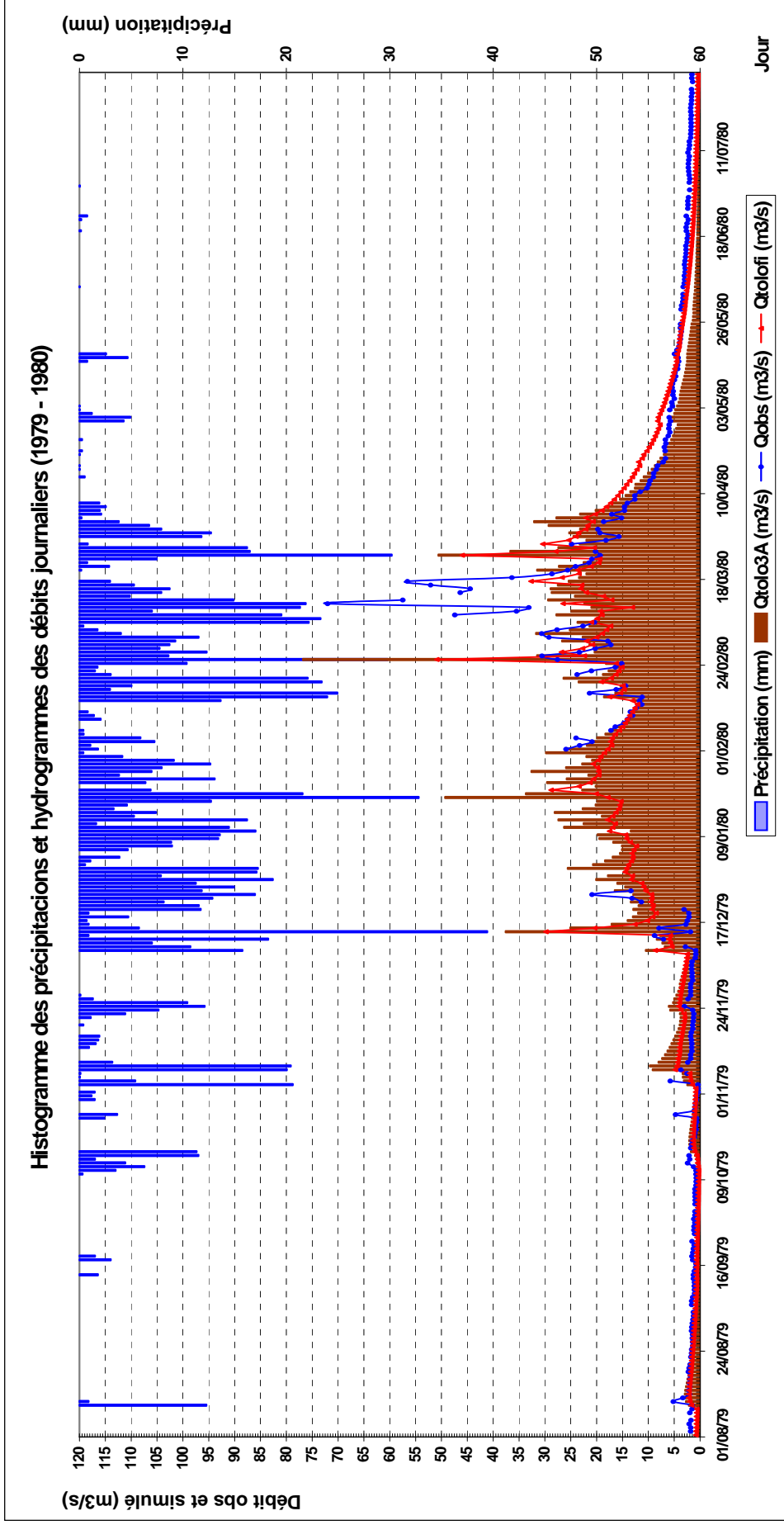


FIGURE III-61: évolution temporelle des hydrogrammes des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolofi}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1978 à 1980. Station de San Jacinto (run 103) - Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-62:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolo3A}$ ;  $Q_{tolo3A}$ ) via les modélisations TOLOFI (run 6KUL2) et TOLO3A (run 103) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1978 à 1979 – Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-63:** hydrogrammes des débits journaliers disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et des débits simulés ( $Q_{tolo3A}$ ;  $Q_{tolo3A}$ ) via les modélisations TOLOFI (run 6KUL2) et TOLO3A (run 103) et histogramme des valeurs journalières des précipitations correspondantes aux mêmes dates pour la phase de validation sur la période de 1979 à 1980 – Bassin de la Tolomosa

On remarque que les débits de pointe sont nettement mieux marqués via la modélisation TOLO3A que via la modélisation TOLOFI.

### III-6.5 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats de la simulation sont analysés en examinant les débits observés et simulés au niveau annuel, mensuel et journalier sur la période de 1977 à 1980.

#### III-6.5.1 BILAN HYDROLOGIQUE

Les résultats concernent l'ensemble des années de calibrage et validation, c'est-à-dire les années hydrologiques de 1977 à 1980. Le tableau III-40 présente, pour le bassin versant de la Tolomosa, les valeurs annuelles moyennes simulées des termes du bilan en eau par année hydrologique sur la période de 1977 à 1980.

**TABLEAU III-40: résultats annuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLO3A (run 98) sur la période de 1977 à 1980 – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
<b>Moyenne annuelle</b>	1.360	805	536	13	14	549

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Le tableau III-41 présente les valeurs mensuelles moyennes simulées des termes du bilan en eau via TOLO3A par année hydrologique sur la période de 1977 à 1980.

**TABLEAU III-41: résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLO3A sur la période de 1977 à 1980 - Bassin de la Tolomosa**

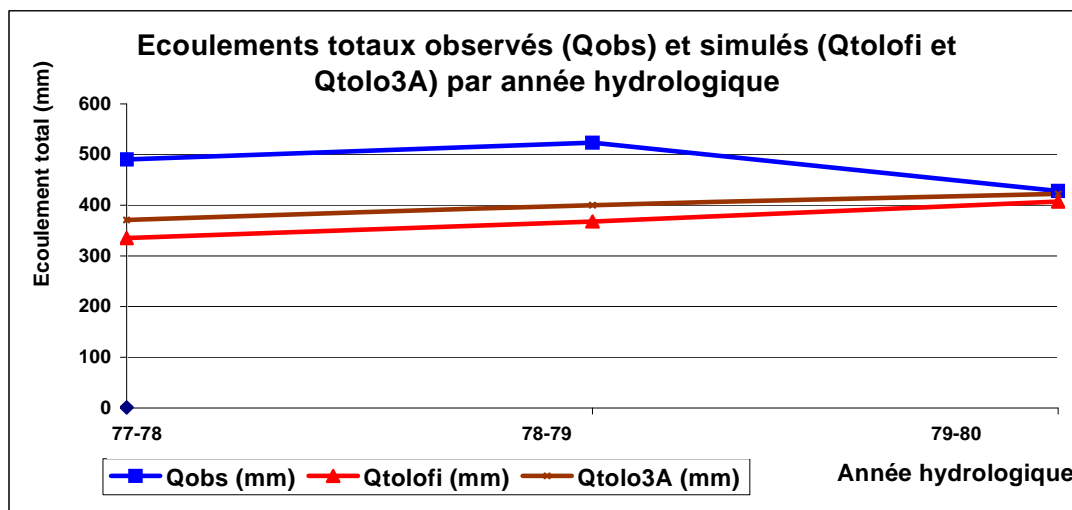
Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (mm)
Août	26	14	5	0	0	5
Septembre	19	19	6	0	0	6
Octobre	64	45	17	0	0	17
Novembre	146	73	38	0	1	38
Décembre	262	121	77	1	3	78
Janvier	261	137	104	2	4	106
Février	244	132	114	3	3	117
Mars	266	158	111	3	2	114
Avril	56	67	49	2	0	51
Mai	7	23	12	1	0	13
Juin	3	9	2	1	0	3
Juillet	8	8	2	0	0	3
<b>TOTAL</b>	<b>1.360</b>	<b>805</b>	<b>536</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>549</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

#### III-6.5.2 HYDROGRAMMES ANNUELS

Les écoulements totaux annuels observés et simulés par SWAT via TOLO3A sont donnés sur le graphique de la figure III-64 sur la période de 1977 à 1980 par année hydrologique (77-78; 78-79; 79-80). L'année 76-77, rappelons-le, est l'année de mise en régime.



**FIGURE III-64: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$  et  $Q_{tolo3A}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1980 – Bassin de la Tolomosa**

Comme déjà constatée précédemment, la corrélation entre les données observées et simulées de la modélisation TOLO3A est meilleure que celle obtenue via la modélisation TOLOFI. Durant les deux premières années hydrologiques (1977–78 et 1978–79), la sous-estimation des écoulements simulés par rapport aux écoulements observés via TOLO3A est moins marquée que via TOLOFI.

### III-6.5.3 HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES DES ÉCOULEMENTS

Le graphique de la figure III-65 compare les hydrogrammes partiels du total mensuel moyen des débits disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3a}$  et  $Q_{tolofi}$ ) avec l'histogramme des précipitations mensuelles pour les mêmes dates sur la période de 1978 à 1980.

L'allure de la variation saisonnière des données de débit de la modélisation TOLO3A est plus proche de celle des données observées que dans le cas de la modélisation TOLOFI.

### III-6.5.4 COURBES ANNUELLES DES DEBITS CLASSES

En dehors de la visualisation chronologique des débits, on peut ordonner la succession des débits journaliers par ordre de grandeur croissante ou décroissante (classement monotone). Les graphiques des figures III-66 à III-68 donnent, en ordonnée et par année hydrologique, la valeur du débit observé ( $Q_{obs}$ ) ou simulé ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolofi}$ ) atteinte ou dépassée en pourcentage de la période d'observation indiquée en abscisse. A défaut de séries annuelles observées complètes, ce classement pour comparaison observé-simulé est effectué en tenant compte uniquement des valeurs des dates d'observation.

L'analyse visuelle des courbes des débits journaliers classés confirme la tendance à la sous-estimation du débit simulé par rapport au débit observé, mais avec une atténuation importante: les débits simulés via TOLO3A se rapprochent beaucoup plus des débits observés que ceux simulés via TOLOFI.

Le tableau III-42 indique les débits simulés moyens et d'étiage obtenus à partir de la modélisation TOLO3A.

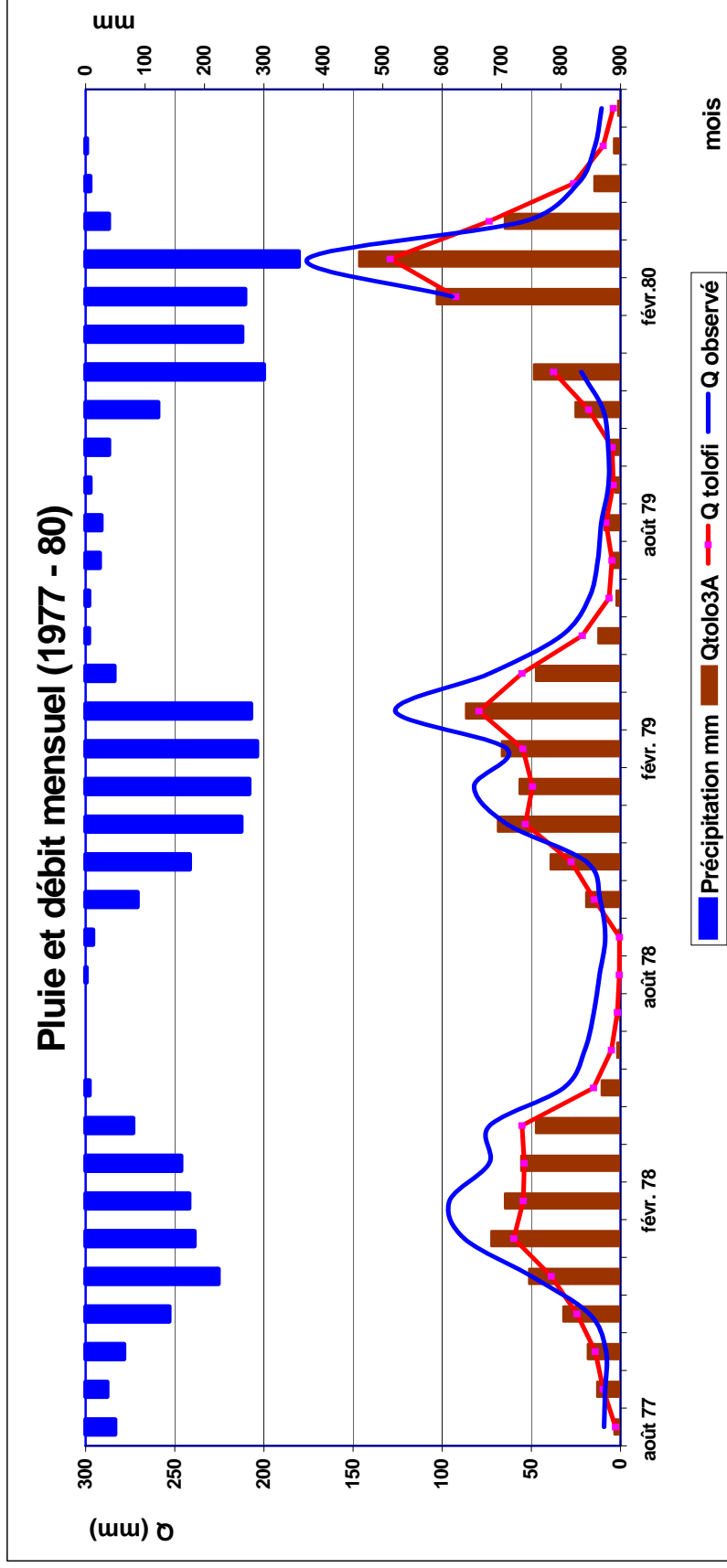
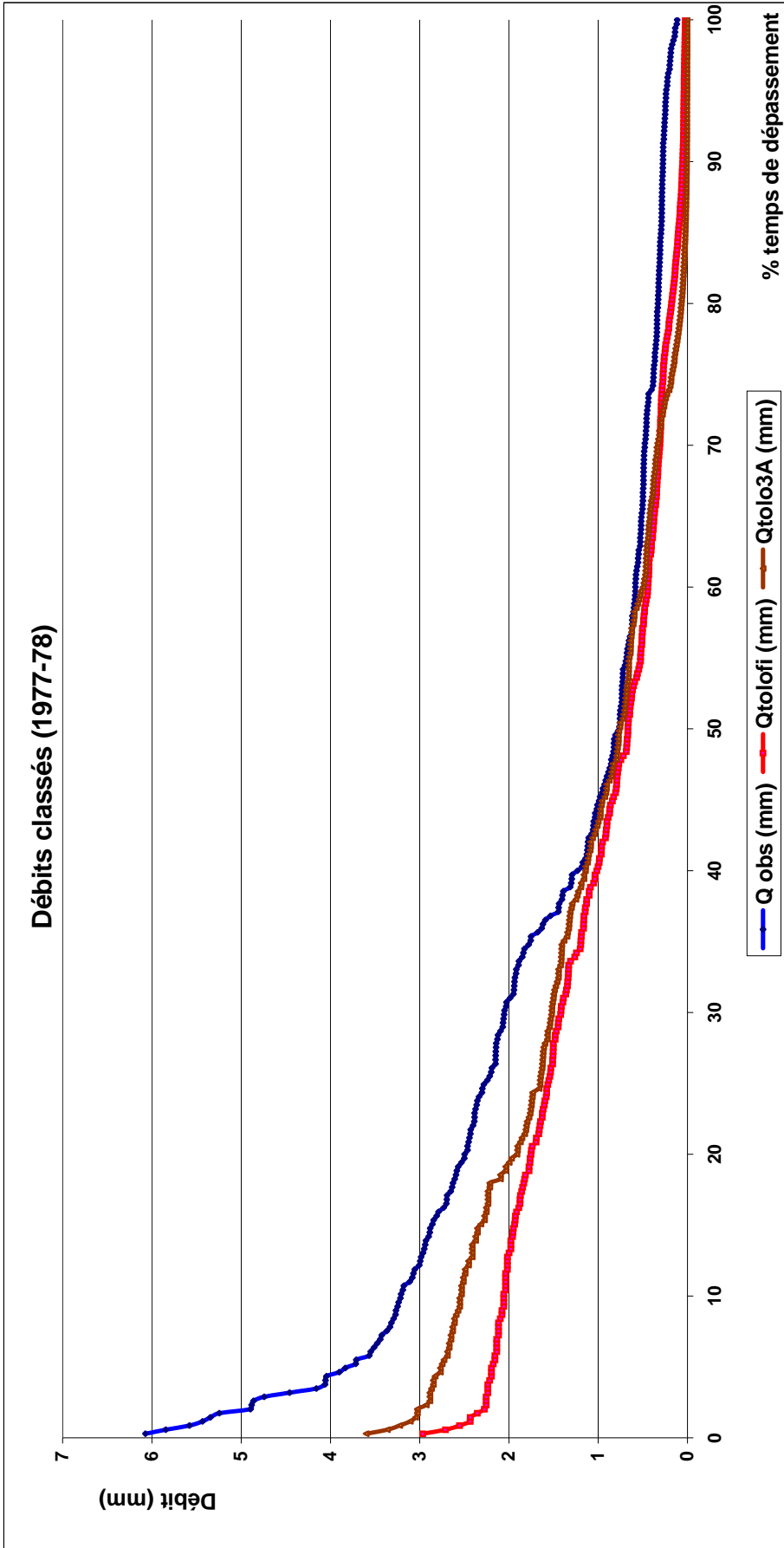
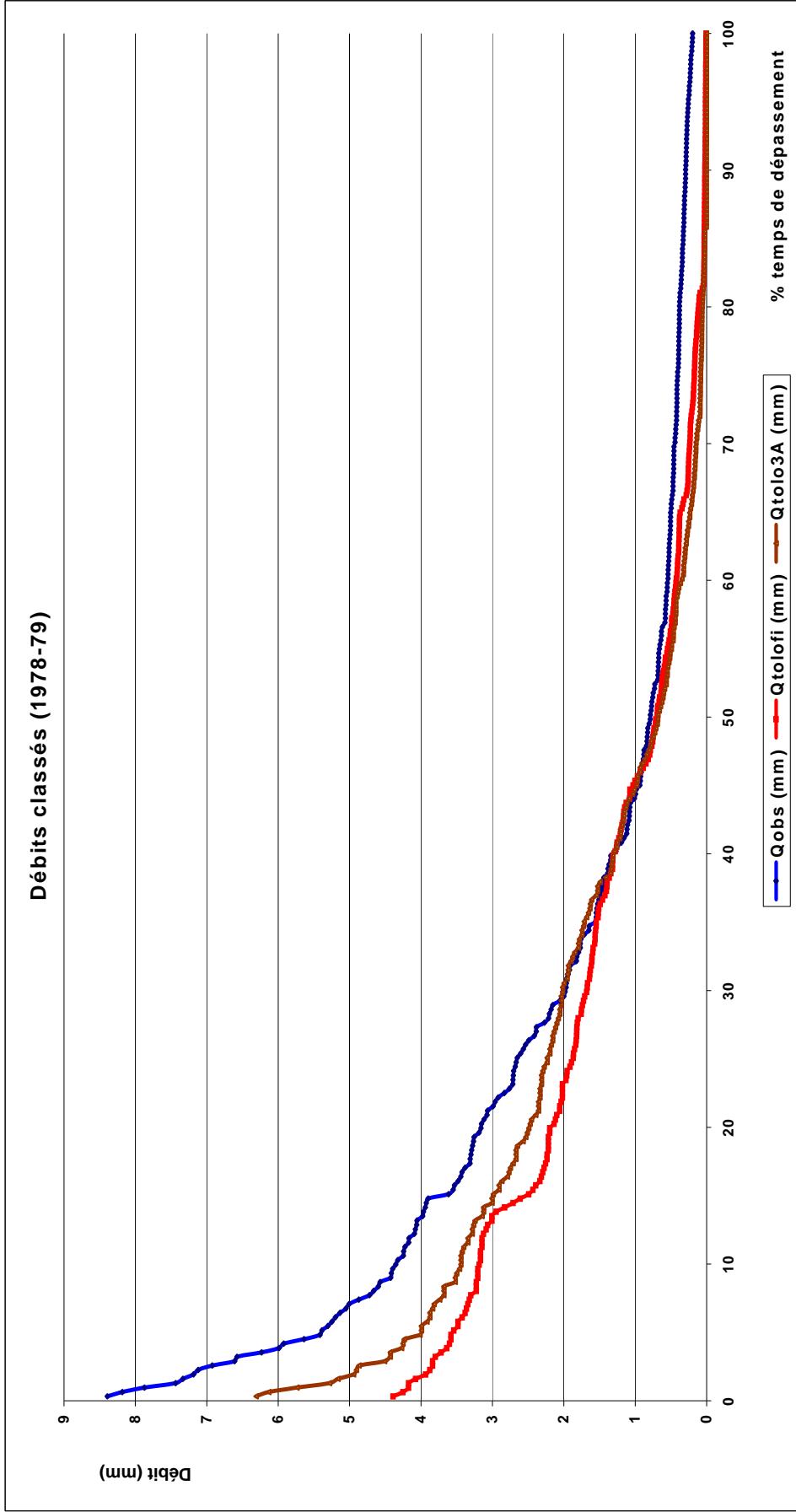


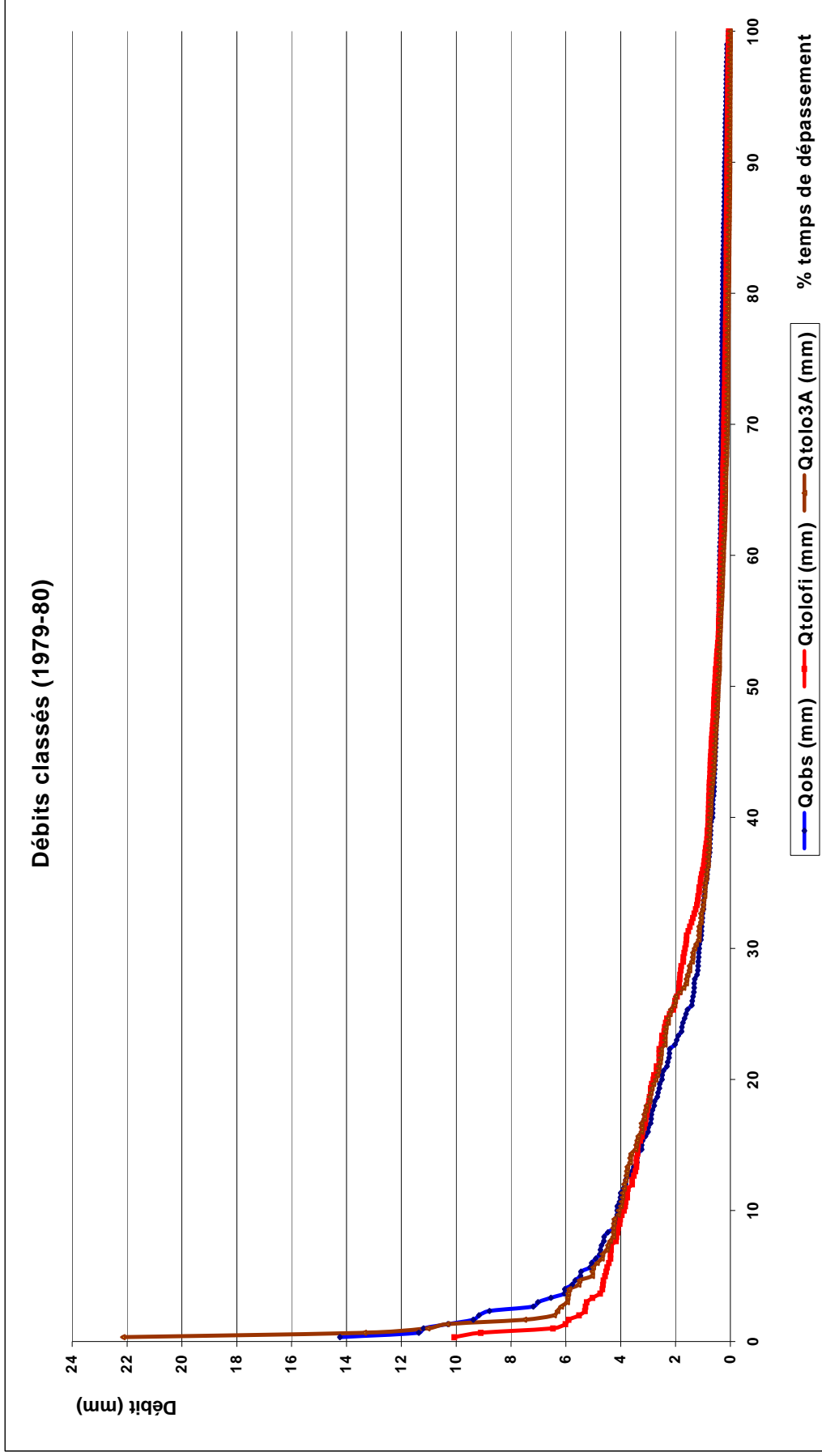
FIGURE III-65: évolution temporelle du total mensuel moyen des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolo3A}$  et  $Q_{tolofi}$ ) à l'exutoire et des précipitations mensuelles correspondantes aux mêmes dates sur la période de 1977 à 1980- Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-66:** comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi3A}$  et  $Q_{tolofi}$ ) sur la période de l'année hydrologique 1977-78 – Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-67:** comparaison entre les débits journaliers classés observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) et simulés ( $Q_{\text{tolo3A}}$  et  $Q_{\text{tolo3A}}$ ) sur la période de l'année hydrologique 1978-79 – Bassin de la Tolomosa



**FIGURE III-68:** comparaison entre les débits journaliers classés observés (Q<sub>obs</sub>) et simulés (Q<sub>tolo3A</sub> et Q<sub>tolofi</sub>) sur la période de l'année hydrologique 1979-80 – Bassin de la Tolomosa

**TABLEAU III-42: débits caractéristiques simulés moyens et d'étiage (DCE) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Débit d'étiage (DCE) (mm/jour)	Débit moyen (mm/jour)
77-78	0,01	0,76
78-79	0,01	0,68
79-80	0,02	0,46
Moyenne	0,0013	0,63

Les résultats des débits caractéristiques indiquent la valeur en mm/jour du débit journalier dépassé 365 jours par an (étiage) ou six mois par an (moyen) et donc, non atteinte durant les six mois restants. Ces résultats ne sont qu'indicatifs et seront pris avec prudence compte tenu des incertitudes associées à la modélisation et aux données d'observation.

### III-6.6 RENDEMENT EN SEDIMENT

La valeur simulée du rendement annuel en sédiment SYLD (t/ha) pour le bassin et par sous-bassin est présentée dans le tableau III-43. Rappelons que le rendement annuel en sédiment calculé à partir des bathymétries effectuées dans le réservoir de San Jacinto est de 14,5 t/ha/an (confer point II-4.5).

**TABLEAU III-43: rendement annuel moyen en sédiment SYLD estimé par sous-bassin via la modélisation TOLO3A (run 98) sur la période de 1977 à 1980 - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin / HRU	SYLD annuel (t/ha)
TolomosaA	3,1
Mena	83,8
Sola	2,1
Pinos	4,2
Bassin versant	15,3

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

Le taux de rendement annuel en sédiment calculé par le modèle SWAT est de 15 t/ha/an, c'est-à-dire très proche du résultat obtenu des bathymétries du réservoir. Les valeurs obtenues par sous-bassin montrent une forte érosion dans le sous-bassin de la Mena, avec 84 t/ha/an, variant de 2 t/ha/an à 4 t/ha/an dans les autres sous-bassins.

On remarque aussi que les résultats de la modélisation du rendement en sédiment via TOLO3A du sous-bassin TolomosaA tiennent mieux compte que les modélisations précédentes des caractéristiques physiques de la partie fluvio-lacustre qui révèle un degré très sévère d'érosion (confer carte de la figure I-10).

### III-6.7 CONCLUSIONS DE LA MODELISATION

L'utilisation d'un nombre réduit d'années pour la phase de calibrage (une année d'observation) et de validation (deux années de validation) a amélioré les résultats de la simulation des débits de crue grâce vraisemblablement au plus grand nombre d'observations historiques.

On constate que les performances obtenues au contrôle sur les critères de Nash et  $R^2$  de TOLO3A sont moins robustes que dans le cas de la modélisation TOLOFI, surtout lorsque sont utilisées les valeurs des CN de la matrice.

Enfin, la modélisation rend bien le taux de rendement en sédiment du bassin versant qui a une valeur proche de celle calculée par les bathymétries.

### III-7 MODELISATION DU BILAN EN EAU ACTUEL via TOLOHRU

On appelle TOLOHRU la modélisation qui décrit la situation actuelle du bilan en eau du bassin versant. La modélisation TOLOHRU diffère des modélisations précédentes par son découpage spatial plus fin.

### III-7.1 DISCRETISATION SPATIALE

Dans la modélisation TOLOHRU, l'hypothèse d'une HRU dominante par sous-bassin est abandonnée au profit d'une discrétisation spatiale plus fine en faisant varier le seuil qui fixe la surface minimum de la combinaison unique entre une unité de sol et d'occupation des terres. Le but est de mieux refléter les variations spatiales des caractéristiques biophysiques du bassin par l'augmentation du nombre d'HRU en supposant obtenir une influence sur certains paramètres de la modélisation du bilan en eau (Tripathi et al., 2006; Muleta et al., 2007). Le nombre croissant d'HRU rend chacune d'elle plus homogène et rapproche le modèle de la notion « physiquement basé ».

Les différents seuils analysés pour fixer la surface minimum de l'HRU sont repris dans le tableau III-44.

**TABLEAU III-44: unités d'occupation des terres et de sol (HRU) présentes par surface seuil – Bassin de la Tolomosa**

Occupation des terres			Sol		
Unité	Superficie dans le bassin versant		Unité	Superficie dans le bassin versant	
	(ha)	(%)		(ha)	(%)
<b>Aucun seuil</b>			<b>Aucun seuil</b>		
WPAS	6.271	15	LEDB(2)	9.386	22
AGRC	5.833	14	JDER(2)	4.028	10
PAST	16.181	39	IGFA	6.383	15
SPAS	5.766	14	JDER	4.051	10
RNGB	2.658	6	LEDB(3)	4.299	10
RNGE	2.460	6	LEDK	3.421	8
FRST	1.165	3	LEDN	1.924	5
URLD	61	0,15	LEDB	2.122	5
WATR	1.508	4	JCHX	2.282	5
			JDER(3)	1.890	5
			JDCJ	1.368	3
			JDER(4)	1.849	2
<b>TOTAL</b>	<b>41.904</b>	<b>100</b>		<b>41.904</b>	<b>100</b>
<b>Seuil dominant</b>			<b>Seuil dominant</b>		
PAST	16.181	39	IGFA	6.383	15
WPAS	6.271	15	LEDB(2)	9.386	22
			LEDB	2.122	5
<b>TOTAL</b>	<b>22.452</b>	<b>54</b>		<b>17.891</b>	<b>42</b>
<b>Seuil de 20%</b>			<b>Seuil de 25%</b>		
PAST	16.181	39	IGFA	6.383	15
WPAS	6.271	15	LEDB(2)	9.386	22
AGRC	5.833	14	JCHX	2.282	5
			LEDB(3)	4.299	10
			LEDK	3.421	8
			JDER(2)	4.028	10
<b>TOTAL</b>	<b>28.285</b>	<b>68</b>		<b>29.799</b>	<b>70</b>
<b>Seuil de 20%</b>			<b>Seuil de 20%</b>		
PAST	16.181	39	JCHX	2.282	5
WPAS	6.271	15	JDER	4.051	10
AGRC	5.833	14	IGFA	6.383	15
		68	LEDB(2)	9.386	22
			LEDB(3)	4.299	10
			LEDK	3.421	8
			JDER(2)	4.028	10
<b>TOTAL</b>	<b>28.285</b>	<b>68</b>		<b>3.850</b>	<b>80</b>

Occupation des terres			Sol		
Unité	Superficie dans le bassin versant		Unité	Superficie dans le bassin versant	
	(ha)	(%)		(ha)	(%)
<b>Seuil de 20%</b>			<b>Seuil de 15%</b>		
PAST	16.181	39	JCHX	2.282	5
WPAS	6.271	15	JDER	4.051	10
AGRC	5.833	14	IGFA	6.383	15
		68	LEDB(2)	9.386	22
			LEDB(3)	4.299	10
			LEDB	2.122	5
			LEDK	3.421	8
			JDCJ	1.368	3
			JDER(2)	4.028	10
<b>TOTAL</b>	<b>28.285</b>	<b>68</b>		<b>37.340</b>	<b>88</b>
<b>Seuil de 20%</b>			<b>Seuil de 10%</b>		
PAST	16.181	39	JCHX	2.282	5
WPAS	6.271	15	JDER	4.051	10
AGRC	5.833	14	IGFA	6.383	15
			LED2	9.386	22
			LED3	4.299	10
			LEDB	2.122	5
			LEDK	3.421	8
			LEDN	1.924	5
			JDCJ	1.368	3
			JDER(2)	4.028	10
			JDER(3)	1.890	5
<b>TOTAL</b>	<b>28.285</b>	<b>68</b>		<b>41.154</b>	<b>98</b>

L'analyse du tableau III-44 montre que le choix d'un seuil de 20% indiquant la surface minimum des unités d'occupation des terres capte 68% de l'occupation actuelle du bassin, y compris les surfaces agricoles. Le seuil de 25% capte 70% des sols trouvés dans le bassin. Nous considérons que la réalité biophysique du bassin est bien représentée en utilisant ces deux seuils mentionnés, et cela sans trop alourdir les procédés de calculs.

Avec le seuil de 20% pour les unités d'occupation des terres et de 25% pour les sols, le modèle définit huit HRU différentes qui sont données dans le tableau III-45. Rappelons que l'HRU d'un bassin se présente sous forme de plages discontinues avec des tailles variables.

**TABLEAU III-45: superficie et paramètre CN des huit HRU définies pour la modélisation TOLOHRU (run 135) – Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	HRU (N°)	HRU (type)	Superficie HRU		CN <sub>2</sub> SWAT	CN <sub>2S</sub> SWAT
			(ha)	(%)		
TolomosaA	1	WPAS/JDER(2)	2.766	21	79	82
	2	WPAS/LEDK	4.059	31	69	73
	3	AGRC/JDER(2)	6.179	48	81	84
Mena	4	PAST/LEDB(3)	2.716	42	69	73
	5	WPAS/JCHX	1.721	27	69	73
	6	WPAS/LEDK	1.980	31	69	73
Sola	7	PAST/IGFA	14.302	100	69	74
Pinos	8	PAST/LEDB(2)	8.812	100	69	74
<b>TOTAL</b>			<b>41.904</b>	<b>100</b>		

Ce nouveau découpage spatial rend mieux compte de l'hétérogénéité de la pédologie et de l'occupation des terres, avec l'apparition de deux nouvelles unités de sol (JDER et JDHX) et d'une

unité d'occupation des terres (AGRC) qui seront prises en considération lors de la modélisation du bilan hydrique via TOLOHRU.

### III-7.2 PHASE DE CALIBRAGE

#### III-7.2.1 VALEUR DES PARAMETRES

Les valeurs finales des vingt-cinq paramètres issues soit du calibrage, soit des informations de terrain et de la littérature ou, enfin, des valeurs par défaut du logiciel sont reprises dans le tableau III-47.

#### III-7.2.2 CRITERES STATISTIQUES

##### III-7.2.2.1 Coefficients d'efficience et de détermination et écart-type

La correspondance entre les débits journaliers observés et simulés a été évaluée grâce aux trois critères statistiques retenus (confer point II-3.5). Les valeurs de ces trois critères statistiques utilisés pour évaluer la performance de la modélisation TOLOHRU, calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81, sont données dans le tableau III-46 (pas de temps journalier).

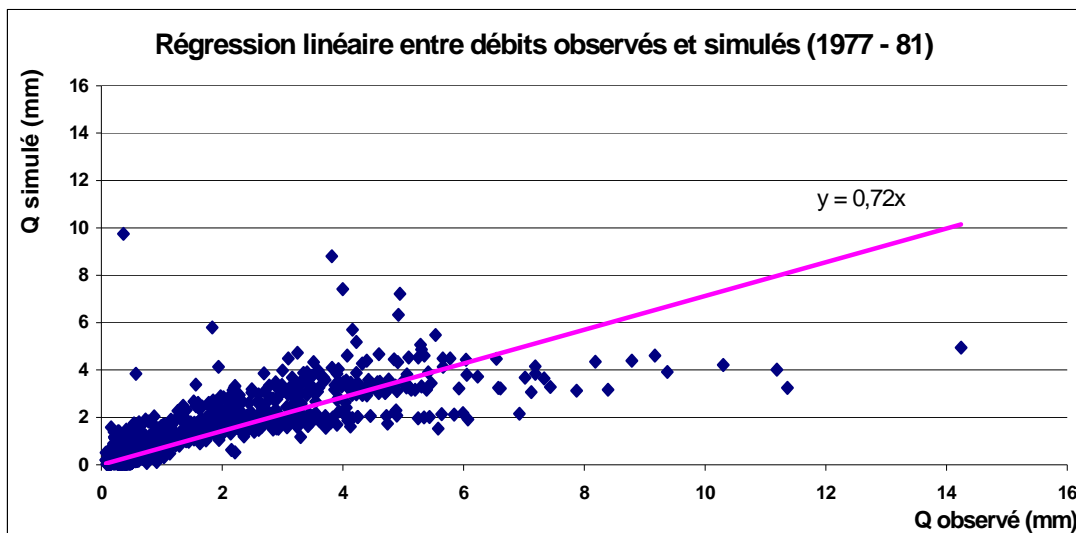
**TABLEAU III-46: valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOHRU calculées pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 - Bassin de la Tolomosa.**

Critère statistique	Valeur
EF (efficience de Nash et Sutcliffe)	0,69
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,71
Ecart-type résiduel	6,7 m <sup>3</sup> /s

Les valeurs du coefficient d'efficience EF (0,69) et du coefficient de détermination (0,71) permettent de considérer, pour les conditions locales, la modélisation comme apte à représenter le comportement hydrologique du bassin versant de la Tolomosa (Gassman et al., 2007; Motovilov et al., 1999 cités par Watson et al., 2005). L'écart-type résiduel est de 6,7 m<sup>3</sup>/s.

##### III-7.2.2.2 Régression des moindres carrés

La régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs en mm des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes est présentée sur le graphique de la figure III-69 pour la phase de calibrage.



**FIGURE III-69: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolohru}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage sur la période d'août 77 à juillet 81 (run 135) - Bassin de la Tolomosa**

**TABLEAU III-47: valeurs finales des paramètres de la modélisation TOLOHRU obtenues par calibrage (1), des données de terrain, littérature, etc. (2) ou des valeurs par défaut du logiciel (3) du modèle (run 135) - Bassin de la Tolomosa**

Fichiers	Paramètre	Unité	Valeur (*)	Valeur finale											
				TolomosaA					Mena					Sola PAST/IGFA	Pinos PAST/LEDB(2)
				WPAS/JDER(2)	WPAS/LEDK	AGRC/JDER(2)	PAST/LEDB(3)	WPAS/JCHX	WPAS/LEDK						
<b>Paramètres liés aux processus de l'évapotranspiration</b>															
.hru	ESCO (1)	---	0,95	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	
.hru	EPCO (1)	--	1,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
.hru	CANMX (2)	mm	0,0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
.gw	GW_REVAP (1)	---	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
.gw	REVAPMN (1)	mm	1,0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
<b>Paramètres liés aux processus des écoulements</b>															
.mgt	CN <sub>2s</sub> SWAT(2)	--		82	73	84	73	73	73	73	73	73	74	74	
.mgt	USLE_P (3)	--	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Crop.dat	USLE_C (3)	---	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
.hru	OV_N (3)	--	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
.hru	SLSUBBSN (1)	m		18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
.hru	SLOPE (2)	m/m	0,10	0,18	0,18	0,18	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,41	0,25	
<b>Paramètres liés aux processus de transfert des écoulements</b>															
.sub	CH_K1 (3)	mm/hr	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
.sub	CH_N1 (2)	--	0,014	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
.rte	CH_N2 (2)	---	0,014	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,03	
.rte	CH_K2 (2)	mm/hr	0,0	35	35	35	12	12	12	12	12	12	12	12	
.rte	CH_EROD	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Paramètres liés aux processus de l'eau dans le sol</b>															
.sol	SOL_AWC (2)	mm H <sub>2</sub> O /mm sol		0,29	0,28	0,29	0,26	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	
				0,29	0,28	0,29		0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	
				0,29		0,29		0,29		0,29		0,29	0,27	0,27	
				0,29		0,29		0,29		0,29		0,29	0,27	0,27	
.sol	SOL_K (2)	mm/hr		2,5	130	2,5	70	2,5	70	2,5	130	2,5	30	30	
				2,5	130	2,5		2,5	130	2,5	130	2,5	70	70	
				2,5	130	2,5		2,5	130	2,5	130	2,5	30	30	
				2,5	130	2,5		2,5	130	2,5	130	2,5	30	30	
.sol	USLE_K (1)	--	0,25	0,12	0,17	0,12	0,14	0,12	0,13	0,13	0,17	0,14	0,14	0,14	
.gw	GW_DELAY (1)	jour	31	20	40	20	40	20	20	40	40	40	40	40	
.gw	ALPHA_BF (1)	jour	0,048	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
.gw	GWQMN (1)	mm	0,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
.gw	RCHRG_DP (3)	---	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
.gw	SHALLST (1)	mm	0,5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
.hru	LAT_TTIME (1)	jour	0	28	34	28	34	28	28	34	28	34	34	34	

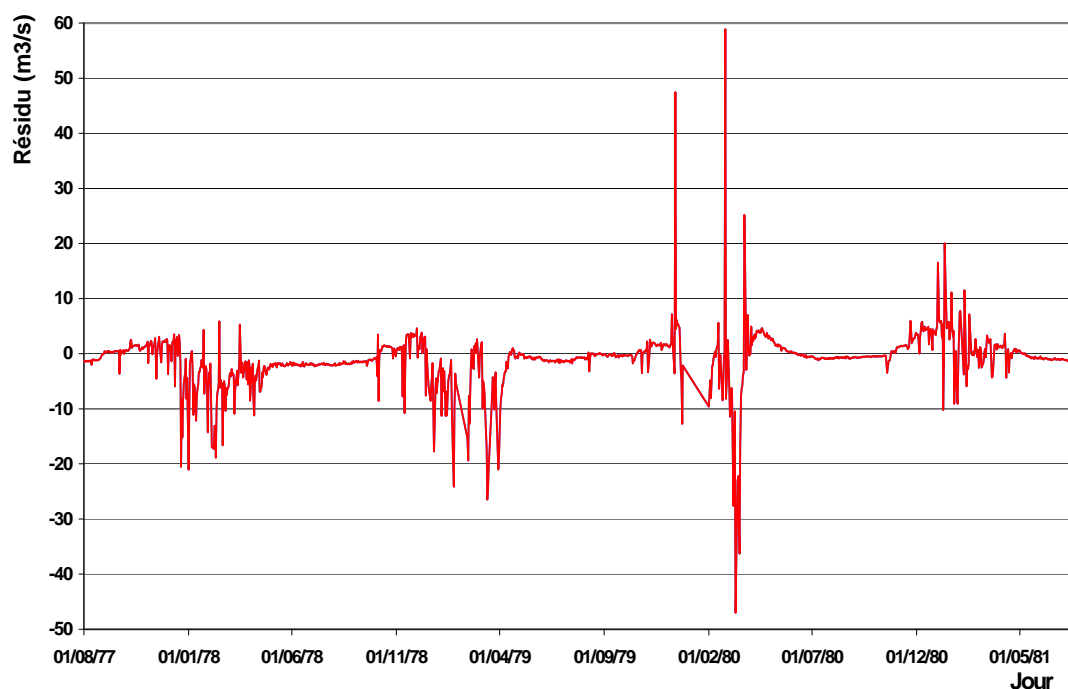
(du fichier TXTINOUT, output SBC)  
 (\*) Initiales lors du calibrage ou par défaut

Le coefficient de régression a une valeur de 0,72. On constate donc une bonne corrélation entre les valeurs des données observées et simulées, malgré une certaine tendance à la sous-estimation des données simulées par rapport à celles observées.

Outre quelques points fortement erratiques aux débits faibles, cette sous-estimation des débits simulés est accentuée pour les débits élevés qui tendent vers un palier. Les observations supérieures à 9 mm correspondent pour la plupart aux pointes de débit observées entre les 8 et 18 mars 1980 (confer annexe II-1).

### III-7.2.2.3 Evolution des résidus

L'évolution de la différence entre les débits observés  $Q_{obs}$  et simulés  $Q_{tolhru}$  (résidus) est donnée sur le graphique de la figure III-70. Rappelons que, pour éviter que les écarts positifs et négatifs se compensent, on utilise le carré du résidu.



**FIGURE III-70: résidus en m<sup>3</sup>/s estimés pour la phase et période de calibrage (1977-81) de la modélisation TOLOHRU (run 135) – Bassin de la Tolomosa**

L'examen du graphique montre que, de manière générale, les résidus sont les plus importants durant la période pluvieuse de décembre à avril. L'écart-type résiduel de 6,7 m<sup>3</sup>/s multiplié par deux, il donne l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des résidus.

### III-7.2.3 RESULTATS DE LA PHASE DE CALIBRAGE

Le tableau III-48 présente globalement pour le bassin versant les valeurs respectives des écoulements annuels simulés par année hydrologique sur la période de 1977 à 1981.

**TABLEAU III-48: résultats du calibrage via TOLOHRU des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période de 1977 à 1981 (run 135) – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)
77-78	1.120	752	7	356	363	6	6
78-79	1.464	916	14	503	517	7	7
79-80	1.497	900	62	512	575	18	18
80-81	1.239	741	35	462	497	7	7
<b>Moyenne</b>	<b>1.331</b>	<b>827</b>	<b>30</b>	<b>458</b>	<b>488</b>	<b>10</b>	<b>10</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

Le tableau III-49 présente globalement pour le bassin versant les résultats du calibrage de la simulation des écoulements mensuels moyens sur la période de 1977 à 1981 de la modélisation TOLO3A.

**TABLEAU III-49: résultats du calibrage via TOLOHRU des écoulements mensuels moyens globaux sur la période de 1977 à 1981 (run 135) - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)
Août	23	13	0	5	5	0	0
Septembre	14	13	0	5	5	0	0
Octobre	73	44	1	11	12	0	0
Novembre	134	71	0	24	24	0	0
Décembre	233	122	4	46	50	0	2
Janvier	290	153	7	75	82	2	3
Février	254	153	10	92	103	3	3
Mars	231	155	6	91	97	2	1
Avril	66	72	0	62	63	1	0
Mai	5	19	0	30	30	0	0
Juin	2	7	0	12	12	0	0
Juillet	6	6	0	6	6	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>1.331</b>	<b>827</b>	<b>29</b>	<b>458</b>	<b>488</b>	<b>9</b>	<b>9</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

### III-7.2.4 EVALUATION DES PERFORMANCES DU CALIBRAGE

L'analyse globale pour le bassin versant porte sur la comparaison entre les résultats de la simulation et les données observées disponibles. Comme la comparaison des bilans ne peut se faire que sur base d'années complètes d'observation, les sommes suivantes correspondent alors à la somme annuelle ou mensuelle jour à jour, uniquement lorsqu'une donnée observée correspond à une donnée simulée.

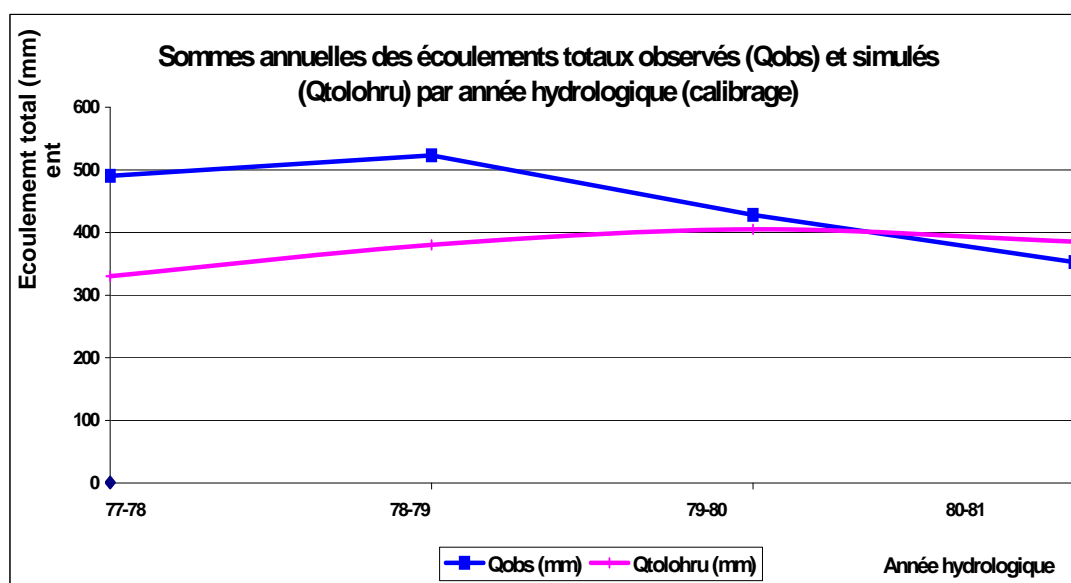
#### III-7.2.4.1 Sommes annuelles des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par SWAT est donnée par année hydrologique (77-78; 78-79; 79-80; 80-81) dans le tableau III-50. Comme précitée, l'année 76-77 de mise en régime pour la simulation n'est pas reprise ici.

**TABLEAU III-50: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Q observé (mm)	Q tolohru (mm)
1977-78	490	330
1978-79	523	380
1979-80	428	405
1980-81	353	386

La comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par SWAT est montrée par année hydrologique sur le graphique de la figure III-71. Comme précitée, l'année 76-77 de mise en régime pour la simulation n'est pas reprise ici.



**FIGURE III-71: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de calibrage – Bassin de la Tolomosa**

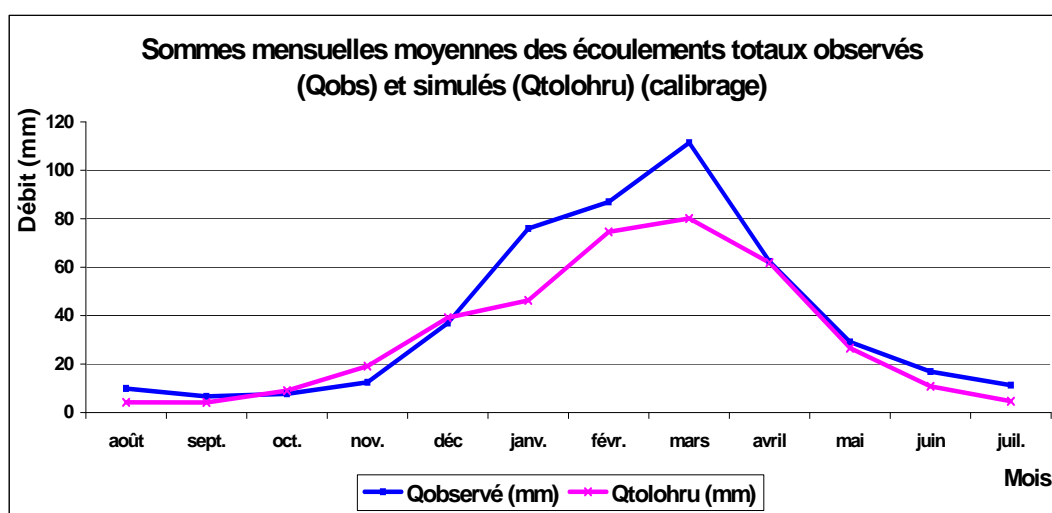
#### **III-7.2.4.2 Sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux**

La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) par SWAT aux dates correspondantes est donnée pour la phase de calibrage par année hydrologique (77-78 à 80-81) dans le tableau III-51. Comme précitée, l'année de mise en régime n'est pas reprise ici.

**TABLEAU III-51: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Q observé (mm)	Q tolohru (mm)
Août	10	4
Septembre	7	4
Octobre	8	9
Novembre	12	19
Décembre	37	39
Janvier	76	46
Février	87	75
Mars	111	80
Avril	62	62
Mai	29	27
Juin	17	11
Juillet	11	5
<b>TOTAL</b>	<b>468</b>	<b>381</b>

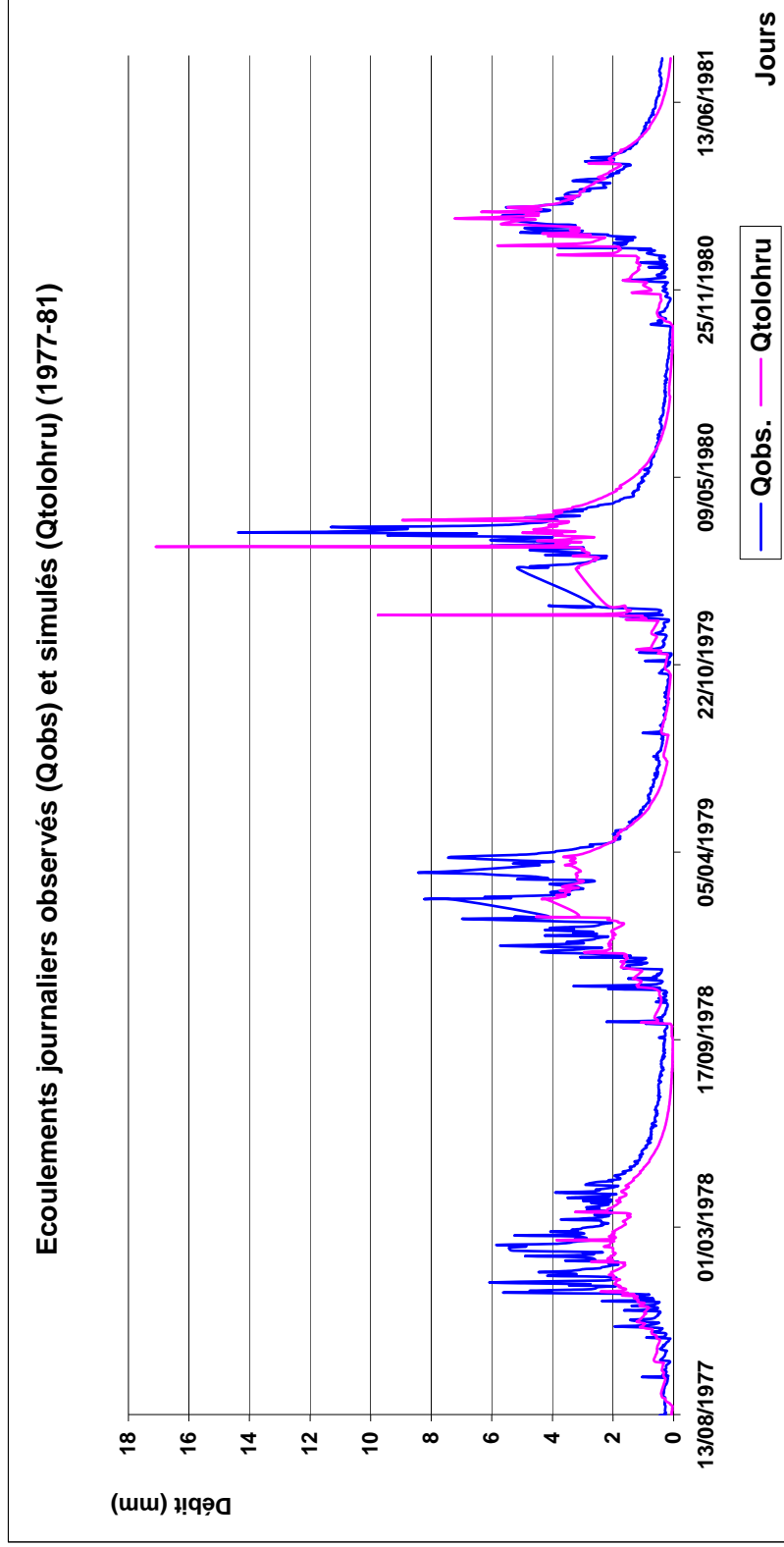
La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) par SWAT aux dates correspondantes est donnée pour la phase de calibrage par année hydrologique (77-78 à 80-81) sur le graphique de la figure III-72. Comme précitée, l'année de mise en régime n'est pas reprise ici.



**FIGURE III-72: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de calibrage - Bassin de la Tolomosa**

#### III-7.2.4.3 Ecoulements journaliers

L'évolution des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) est comparée aux dates correspondantes pour la phase et période de calibrage (1977-81) sur le graphique de la figure III-73.



**FIGURE III-73:** évolution temporelle des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) correspondants (en mm) pour la phase de calibrage sur la période de 1977 à 1981. Station de San Jacinto - Bassin de la Tolomosa

Par l'observation des hydrogrammes, nous constatons que l'allure générale de l'hydrogramme saisonnier simulé est semblable à celle de l'hydrogramme observé et montre un respect général des fluctuations saisonnières, malgré une différence d'ordre de grandeur entre les simulations et les mesures. Au début des années 80, on remarque un décalage chronologique des pics de crue.

Durant l'époque d'étiage, lorsque l'écoulement de base est prédominant, les débits obtenus de la simulation montrent une bonne concordance avec les débits observés, bien que la courbe de récession simulée soit plus rapide que celle observée.

### III-7.3 PHASE DE VALIDATION

#### III-7.3.1 CRITERES STATISTIQUES

##### III-7.3.1.1 Coefficients d'efficience et de détermination et écart-type

Les valeurs des trois critères statistiques utilisés pour évaluer la performance de la modélisation TOLOHRU pour la phase de validation sont données dans le tableau III-52 (pas de temps journalier).

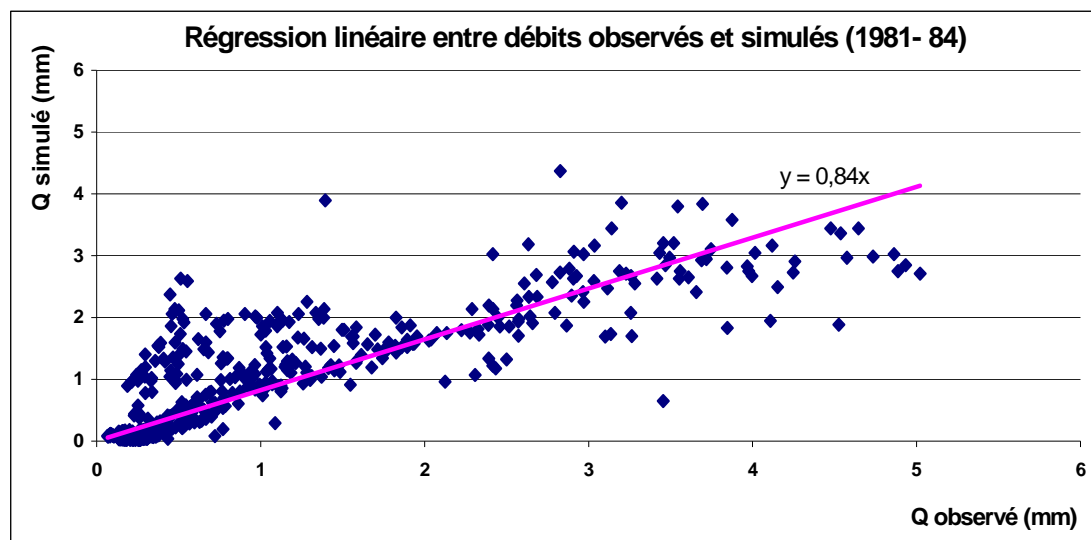
**TABLEAU III-52: valeurs finales des critères statistiques de la modélisation TOLOHRU calculées pour la phase de validation sur la période d'août 1981 à juillet 1984 - Bassin de la Tolomosa.**

Critère statistique	Valeur
EF (efficience de Nash et Sutcliffe)	0,68
R <sup>2</sup> (coefficient de détermination)	0,68
Ecart-type résiduel	5,1 m <sup>3</sup> /s

Les valeurs des critères statistiques de la validation montrent la robustesse de la performance de la modélisation via TOLOHRU.

##### III-7.3.1.2 Régression des moindres carrés

La régression au sens des moindres carrés de la relation entre les valeurs en mm des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes est présentée sur le graphique de la figure III-74 pour la phase de validation.



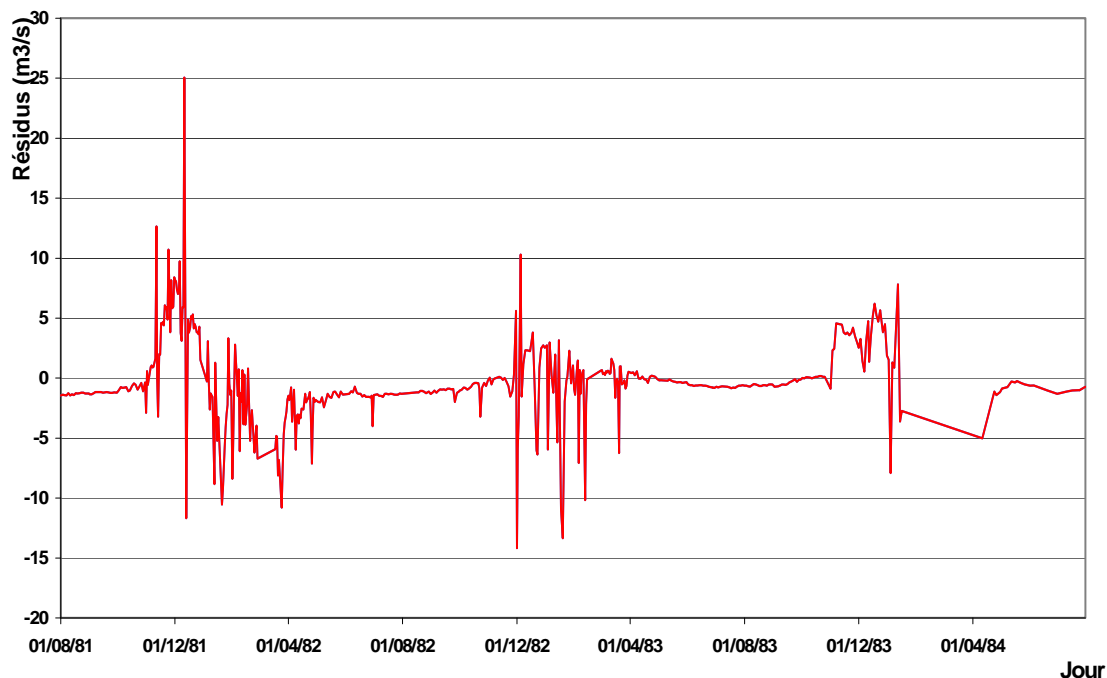
**FIGURE III-74: régression linéaire entre les débits journaliers simulés ( $Q_{tolohru}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation sur la période d'août 81 à juillet 84 (run 135) - Bassin de la Tolomosa**

Le coefficient de régression a une valeur de 0,84. On constate donc une bonne corrélation entre les valeurs des données observées et simulées, malgré une certaine tendance à la sous-estimation des

données simulées par rapport à celles observées. Soulignons que cette tendance à la sous-estimation est plus faible que dans le cas du calibrage.

### III-7.3.1.3 Evolution des résidus

L'évolution de la différence en  $m^3/s$  entre les débits observés  $Q_{obs}$  et simulés  $Q_{tolohru}$  (résidus) est donnée sur le graphique de la figure III-75.



**FIGURE III-75: résidus en  $m^3/s$  pour la phase et période de validation de la modélisation TOLOHRU – Bassin de la Tolomosa**

L'examen du graphique montre que, de manière générale, les résidus sont les plus importants durant la période pluvieuse de décembre à avril. L'écart-type résiduel de  $5,1 m^3/s$  multiplié par deux, il donne l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des résidus.

### III-7.3.2 RESULTATS DE LA PHASE DE VALIDATION

Le tableau III-53 présente les valeurs respectives des écoulements simulés annuels par année hydrologique pour le bassin versant sur la période de 1981 à 1984.

**TABLEAU III-53: résultats de validation de la simulation TOLOHRU des écoulements annuels globaux par année hydrologique sur la période de 1981 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
81-82	1.335	808	520	4	4	524
82-83	707	488	225	2	2	227
83-84	1.133	686	428	15	15	443
<b>Moyenne</b>	<b>1.058</b>	<b>661</b>	<b>391</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>398</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Le tableau III-54 présente, globalement pour le bassin versant, les résultats de la simulation des écoulements mensuels moyens de la phase de validation sur la période de 1981 à 1984 de la modélisation TOLOHRU.

**TABLEAU III-54: résultats de validation de la simulation TOLOHRU des écoulements mensuels moyens par année hydrologique sur la période de 1981 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
Août	3	4	2	0	0	2
Septembre	11	8	1	0	0	1
Octobre	53	22	3	0	0	3
Novembre	162	78	28	0	0	28
Décembre	187	107	54	0	1	54
Janvier	231	130	73	1	2	74
Février	205	134	81	3	4	84
Mars	135	109	68	2	0	70
Avril	57	45	42	1	0	43
Mai	10	16	24	0	0	24
Juin	0	5	10	0	0	10
Juillet	2	3	4	0	0	4
<b>TOTAL</b>	<b>1.058</b>	<b>661</b>	<b>391</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>398</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

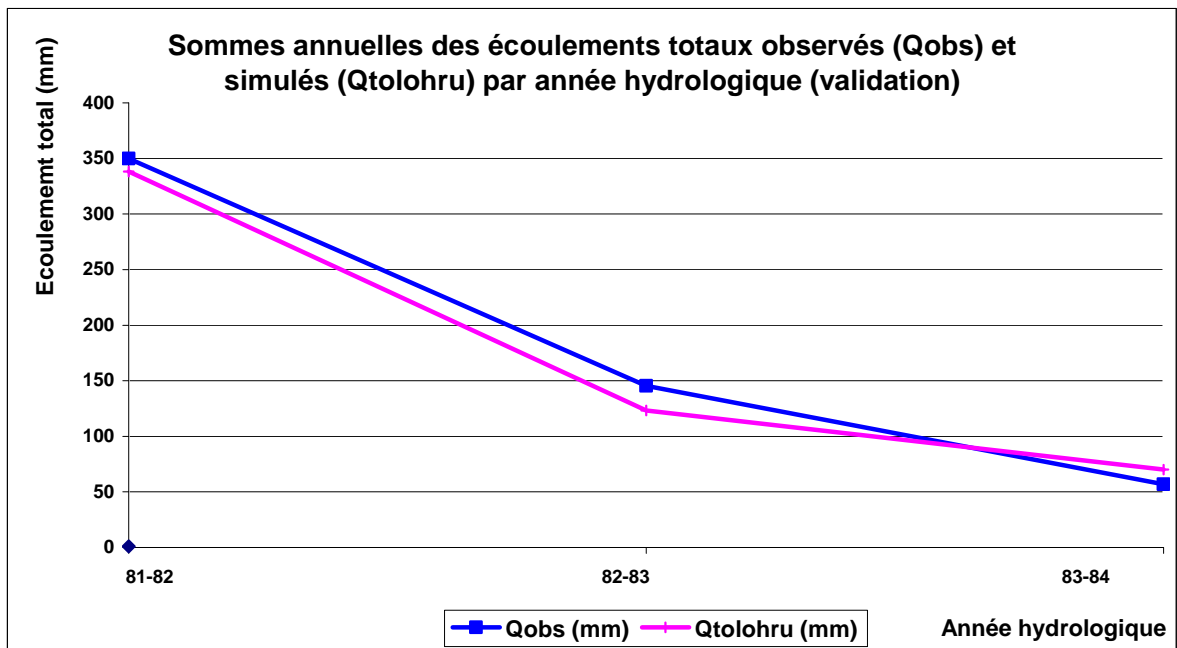
### III-7.3.3 EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA VALIDATION

#### III-7.3.3.1 Sommes annuelles des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés et simulés par SWAT est montrée par année hydrologique dans le tableau III-55 et sur le graphique de la figure III-76.

**TABLEAU III-55: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Q observé (mm)	Q tolohru (mm)
1981-82	350	338
1982-83	146	123
1983-84	57	70



**FIGURE III-76: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique pour la phase de validation – Bassin de la Tolomosa**

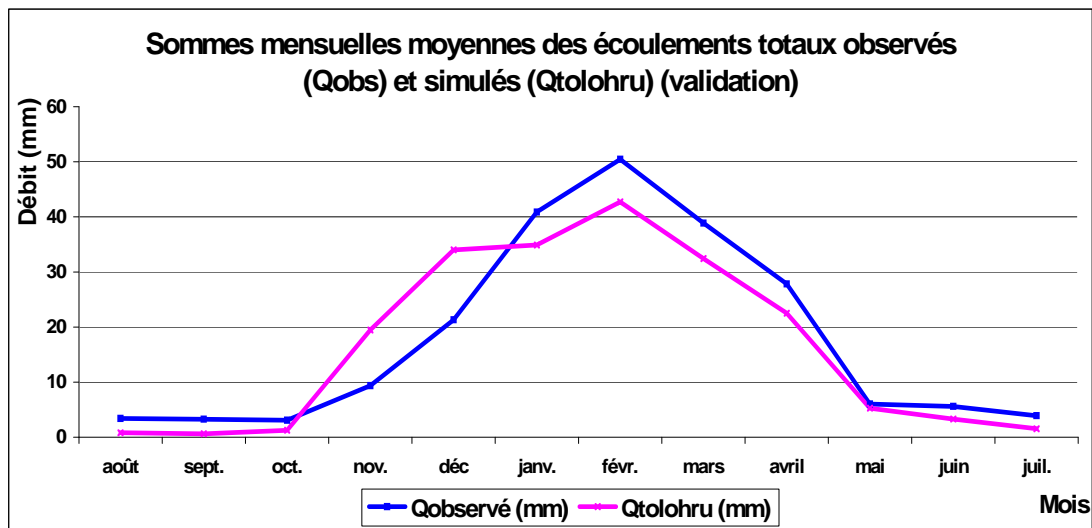
### III-7.3.3.2 Sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux

La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) par SWAT aux dates correspondantes est présentée dans le tableau III-56 pour la phase de validation par année hydrologique (81-82 à 83-84).

**TABLEAU III-56: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Q observé (mm)	Q tolohru (mm)
Août	3	0,81
Septembre	3	0,60
Octobre	3	1,24
Novembre	9	19,45
Décembre	21	33,98
Janvier	41	34,89
Février	50	42,70
Mars	39	32,43
Avril	28	22,50
Mai	6	5,27
Juin	6	3,29
Juillet	4	1,53
<b>TOTAL</b>	<b>214</b>	<b>199</b>

La comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) par SWAT aux dates correspondantes est donnée pour la phase de validation par année hydrologique (81-82 à 83-84) sur le graphique de la figure III-77.



**FIGURE III-77: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes pour la phase de validation - Bassin de la Tolomosa**

### III-7.3.3.3 Écoulements journaliers

L'évolution des débits journaliers observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) est comparée aux dates correspondantes pour la phase et période de validation (1981 à 1984) sur le graphique de la figure III-78.

L'observation des hydrogrammes de la phase de validation montre un bon respect des fluctuations saisonnières. L'allure générale de l'hydrogramme saisonnier simulé est semblable à celle de l'hydrogramme observé.

Durant l'époque d'étiage, lorsque l'écoulement de base est prédominant, les débits obtenus de la simulation montrent une bonne concordance avec les débits observés, malgré une légère sous-estimation de la récession.

Écoulements journaliers observés (Q<sub>obs</sub>) et simulés (Q<sub>tolohru</sub>) (1981 - 84)

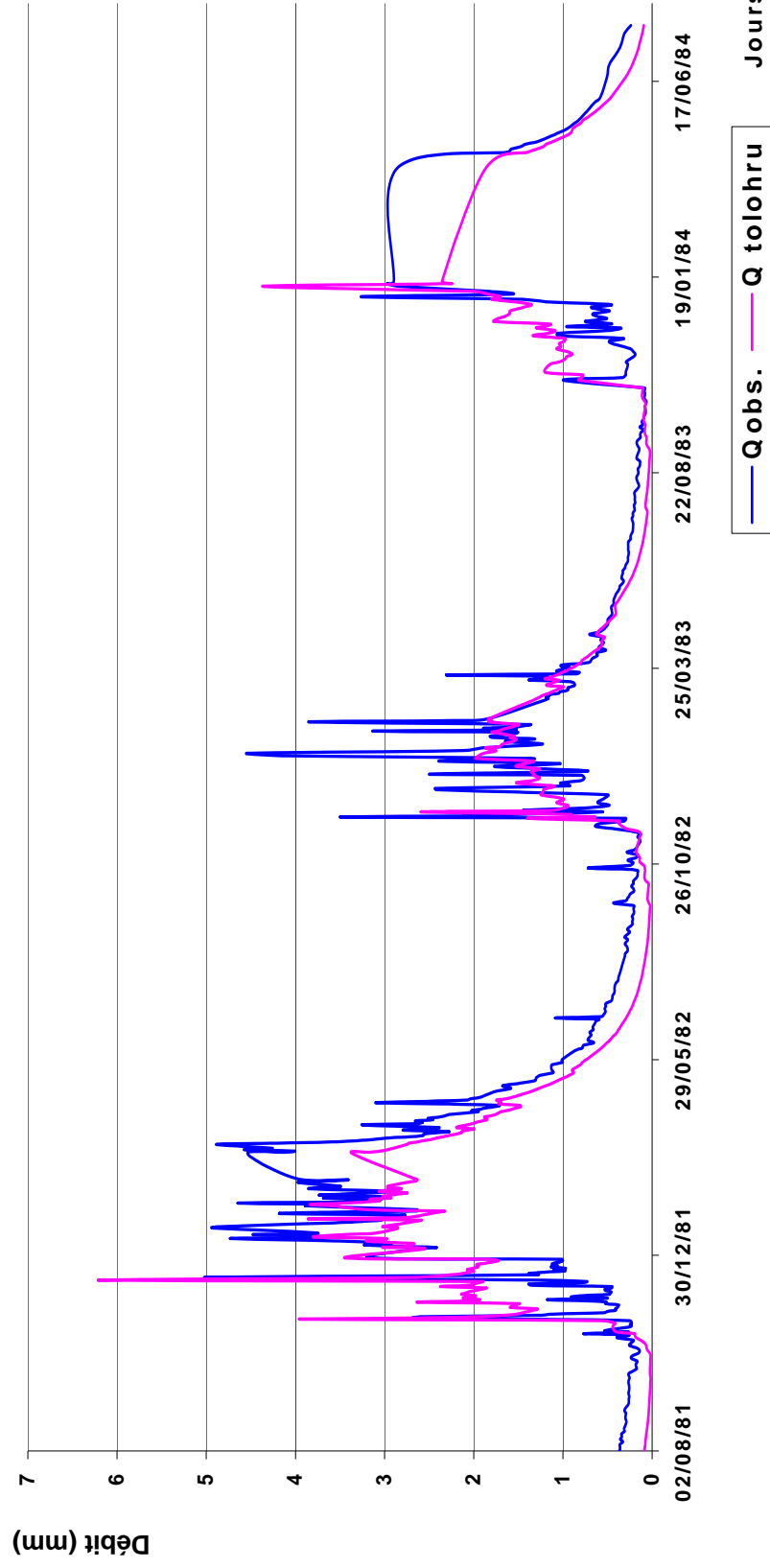


FIGURE III-78: évolution temporelle des débits journaliers observés (Q<sub>obs</sub>) et simulés (Q<sub>tolohru</sub>) correspondants (en mm) pour la phase de validation sur la période de 1981 à 1984. Station de San Jacinto - Bassin de la Tolomosa

### III-7.4 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats de la simulation sont analysés en examinant les débits observés et simulés au niveau annuel, mensuel et journalier sur la période de 1977 à 1984.

#### III-7.4.1 BILAN HYDROLOGIQUE

Le tableau III-57 présente globalement pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs annuelles simulées des termes du bilan en eau par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

**TABLEAU III-57: résultats annuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
<b>Moyenne</b>	1.214	756	446	8	8	454

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Le tableau III-58 présente globalement pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs mensuelles moyennes simulées par année hydrologique des termes du bilan en eau sur la période de 1977 à 1984.

**TABLEAU III-58: résultats mensuels moyens des termes du bilan en eau de la modélisation TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

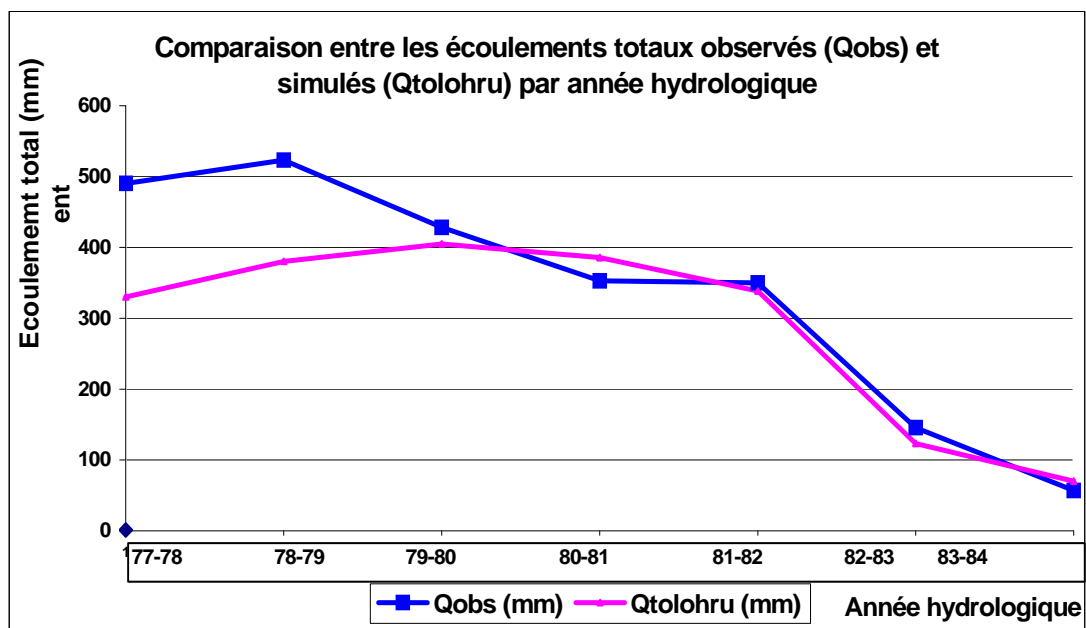
Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
Août	15	9	4	0	0	4
Septembre	13	11	3	0	0	3
Octobre	64	34	8	0	0	8
Novembre	146	74	26	0	0	26
Décembre	213	116	52	0	1	52
Janvier	265	143	78	1	2	79
Février	233	145	94	3	4	97
Mars	190	135	84	2	1	86
Avril	62	60	54	1	0	55
Mai	7	18	27	0	0	27
Juin	1	6	11	0	0	11
Juillet	5	5	5	0	0	5
<b>TOTAL</b>	<b>1.214</b>	<b>756</b>	<b>446</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>454</b>

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

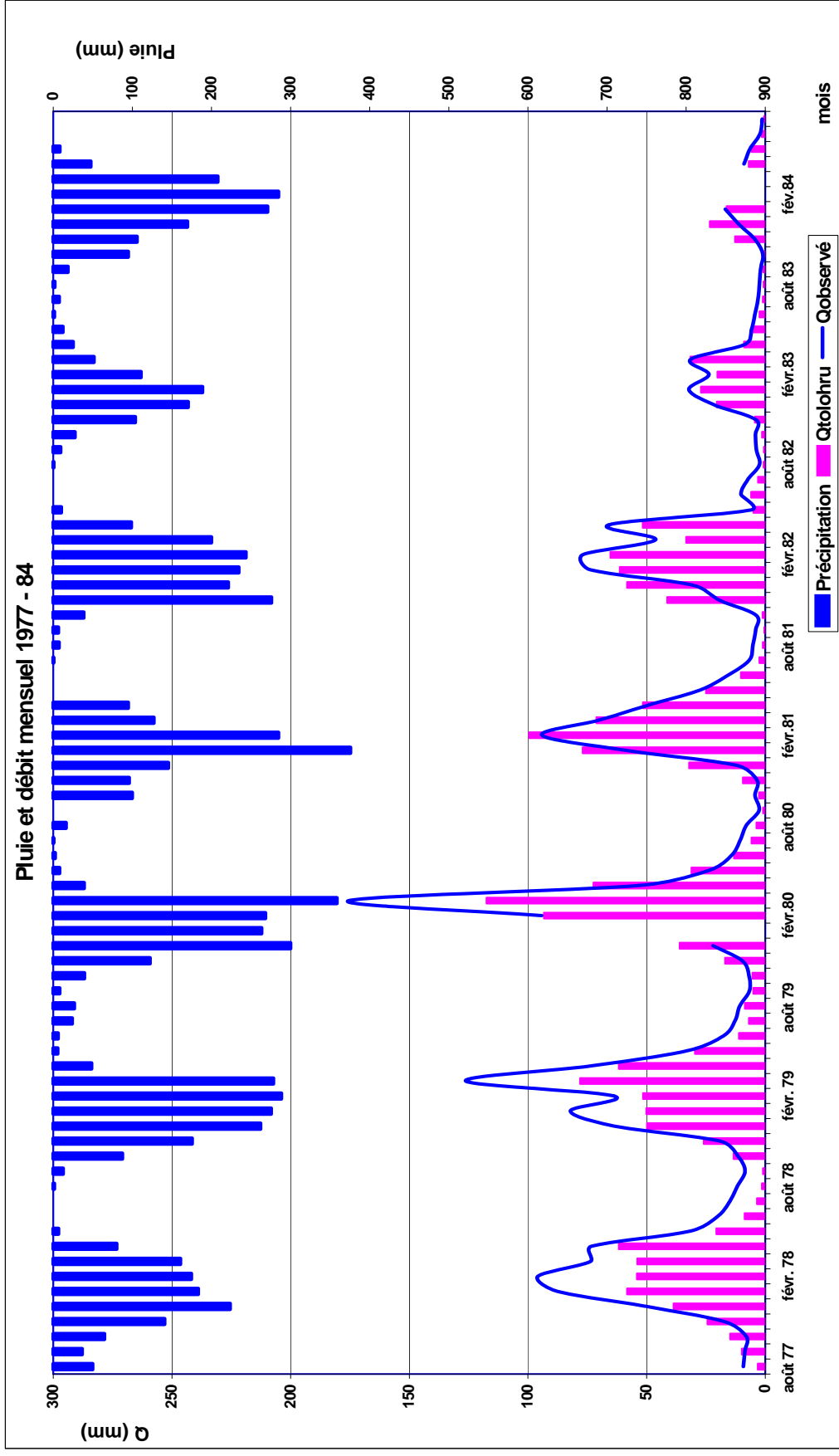
#### III-7.4.2 HYDROGRAMMES ANNUELS

L'écoulement total annuel observé et simulé par SWAT via TOLOHRU est donné sur le graphique de la figure III-79.



**FIGURE III-79: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Le graphique de la figure III-80 compare les hydrogrammes partiels du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) pour les mêmes dates avec l'histogramme des précipitations mensuelles.



**FIGURE III-80:** évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa

L'allure de la variation saisonnière et la position chronologique respective des hautes et basses eaux des hydrogrammes permettent de classer le régime du débit de la rivière en un régime simple caractérisé par un seul maximum et un seul minimum annuel, traduisant la prépondérance du mode d'alimentation pluvial.

L'étiage à la fin de la saison sèche de mai à octobre est aussi bien marqué. Remarquons que, entre autres, les mois de janvier 1980, février 1984 et mars 1984 sont sans données observées.

### III-7.5 RENDEMENT EN SEDIMENT

La valeur simulée du rendement annuel en sédiment SYLD (t/ha) pour le bassin et par HRU est présentée dans le tableau III-59.

**TABLEAU III-59: rendement moyen annuel en sédiment estimé par HRU via la modélisation TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	N° HRU	HRU	SYLD annuel (t/ha)
TolomosaA	1	WPAS/JDER(2)	2,7
	2	WPAS/LEDK	0,9
	3	AGRC/JDER(2)	8
Mena	4	PAST/LEDB(3)	0,1
	5	WPAS/JCHX	0,1
	6	WPAS/LEDK	0,8
Sola	7	PAST/IGFA	0,1
Pinos	8	PAST/LEDB(2)	0,01
Bassin			1,5

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

On constate que les rendements en sédiment sont les plus élevés sur l'unité de sol JDER(2) (association cambisol–lixisol de groupe hydrologique C). La valeur estimée de 1,5 t/ha via TOLOHRU pour l'ensemble du bassin versant est nettement inférieure à celle obtenue à partir des bathymétries (14,5 t/ha/an).

### III-7.6 CONCLUSIONS DE LA MODELISATION

La modélisation TOLOHRU a permis d'améliorer la robustesse de la performance du modèle par rapport aux modélisations précédentes.

Grâce à la modélisation TOLOHRU, les résultats de deux niveaux de discrétisation spatiale du bassin peuvent être comparés: une seule HRU par sous-bassin et une ou plusieurs HRU par sous-bassin. La discrétisation spatiale plus fine en huit HRU n'a pas provoqué de changements significatifs du ruissellement superficiel. En effet, les différentes HRU par sous-bassin ont gardé des CN de valeurs équivalentes à celles obtenues via les modélisations précédentes qui ne considéraient que quatre HRU.

## III-8 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

### III-8.1 CURVE NUMBER

Les valeurs des CN des différentes modélisations sont reprises dans le tableau III-60.

**TABLEAU III-60: valeurs des CN des différentes modélisations des termes du bilan en eau - Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	CN	Valeur du CN par sous-bassin ou HRU			
		TolomosaA	Mena	Sola	Pinos
TOLOSA	CN <sub>2</sub> calibré	54	60	65	62
	CN <sub>2s</sub> calibré	Pas de modélisation			
TOLOSA1	CN <sub>2</sub> calibré	60	65	55	55
	CN <sub>2s</sub> calibré	Pas de modélisation			
TOLOFI	CN <sub>2s</sub> SWAT	73	73	74	74
TOLOMAT	CN <sub>2</sub> SWAT	73	73	74	74
	CN <sub>2</sub> matrice	81	83	74	80
TOLO3A	CN <sub>2s</sub> SWAT	73	73	74	74
	CN <sub>2</sub> matrice	81	83	74	80
TOLOHRU	CN <sub>2s</sub> SWAT	82,73,84	73,73,73	74	74

(valeurs obtenues du tableau SWAT-VIEW, *edit input, subbasins data, MGT file, AvSWAT*)

Mises à part les deux premières modélisations où, rappelons-le, le CN était considéré comme une variable sensible calibrée, on constate que les valeurs du CN calculées par SWAT varient dans une fourchette restreinte entre les différentes modélisations.

### III-8.2 DONNEES CLIMATIQUES

Le modèle SWAT adopte une distribution uniforme de la précipitation et de la température pour chaque sous-bassin, dont les données proviennent de la station la plus proche du centroïde du sous-bassin considéré.

L'écart mis en évidence entre les données des hydrogrammes observés et simulés pourrait en partie s'expliquer par la tendance du modèle à sur-estimer la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) dans la partie nord-ouest du bassin. En effet, la présence de la station météorologique de San Andres dans la région semi-aride, qui s'étend sur le sous-bassin Mena et la seule partie est du sous-bassin TolomosaA, pourrait avoir une influence disproportionnée en englobant en plus la partie ouest du sous-bassin TolomosaA qui jouit d'un climat semi-humide dû, entre autres, à son altitude.

Le manque d'une distribution plus précise des données pluviométriques à l'intérieur du bassin versant limiterait alors les performances du modèle (Hernandez et al., 2000).

### III-8.3 PARAMETRES DU MODELE

Les résultats de l'analyse de la performance du modèle en fonction de certains paramètres peuvent parfois paraître contradictoires vis-à-vis de l'amplitude de l'hydrogramme simulé par rapport à l'hydrogramme observé. Les résultats du calibrage du paramètre de temps de séjour LAT\_TTIME (fixe le temps d'arrivée du ruissellement hypodermique LAT\_Q à la rivière) montrent que le modèle réagit le mieux avec une valeur de LAT\_TTIME de vingt-quatre jours, et cela aux dépens des débits de pointe qui sont moins bien marqués dans l'hydrogramme des débits simulés. On constate donc une contradiction apparente entre l'amplitude de l'hydrogramme simulé et la valeur du critère d'efficacité de Nash. En effet, d'une part, pour mieux répondre aux débits de pointe observés, nous devrions diminuer la valeur de la variable LAT\_TTIME alors que, d'autre part, l'analyse de sensibilité donne la meilleure performance sur une durée relativement longue de vingt-quatre jours. Le même genre de constatation se présente vis-à-vis du paramètre EPCO. Avec la valeur de 0,06 pour le paramètre, l'analyse visuelle de l'hydrogramme simulé montre une légère amélioration des débits de pointe, mais, en même temps, une baisse de l'efficacité.

Face à cette situation, nous avons préféré opter pour une meilleure performance de la modélisation au détriment parfois de l'amplitude de l'hydrogramme simulé puisque l'objectif de cette thèse est plutôt de chercher à connaître le comportement hydrologique du bassin versant et non pas de proposer des ouvrages hydrauliques, dont le dimensionnement est principalement fonction des crues.

### III-8.4 CRITERES STATISTIQUES

La comparaison de la valeur obtenue des critères statistiques entre les quatre modélisations principales des termes du bilan en eau du bassin versant est présentée dans le tableau III-61 (pas de temps journalier).

**TABLEAU III-61: comparaison entre les valeurs des critères statistiques EF (Nash) et  $R^2$  et de l'écart-type résiduel des modélisations TOLOFI, TOLOMAT, TOLO3A et TOLOHRU pour les phases de calibrage et validation – Bassin de la Tolomosa**

Critère par phase	TOLOFI	TOLOMAT	TOLO3A		TOLOHRU
			(CN <sub>2</sub> matrice)	(CN <sub>2S</sub> SWAT)	
<b>Calibrage</b>					
EF (Nash)	0,64	0,52	0,72	0,74	0,69
$R^2$ (coef. de détermination)	0,67	0,57	0,63	0,66	0,71
Ecart-type résiduel (m <sup>3</sup> /s)	6,7	7,3	3,1	3,1	6,7
<b>Validation</b>					
EF (Nash)	0,67	0,51	0,53	0,67	0,68
$R^2$ (coef. de détermination)	0,74	0,56	0,53	0,64	0,68
Ecart-type résiduel (m <sup>3</sup> /s)	5,2	5,7	7,0	6,5	5,1

Les résultats montrent tout d'abord qu'il n'y a pas d'accumulation systématique d'erreurs avec l'élargissement de la période de simulation qui passe de trois ans pour la modélisation TOLO3A à huit ans pour l'ensemble des autres modélisations. En effet, les indices ne varient pas beaucoup avec une plus grande période de simulation.

On constate que les performances obtenues sur les critères statistiques d'efficacité EF (Nash) et  $R^2$  varient peu entre les modélisations TOLOFI, TOLO3A (CN<sub>2S</sub> SWAT) et TOLOHRU et se trouvent dans une fourchette considérée comme acceptable par d'autres études hydrologiques utilisant le modèle SWAT (Gassman et al., 2007; Coffey et al., 2004). Vu la complexité du modèle pour restituer convenablement la dynamique globale du fonctionnement hydrologique des débits à l'exutoire et tenant compte des données incomplètes ou manquantes à tous niveaux ainsi que du problème de réalisme des valeurs des mesures observées de débit très éparses certaines années représentant la moyenne de trois mesures journalières, les résultats obtenus via les modélisations TOLOFI, TOLO3A (CN<sub>2S</sub> SWAT) et TOLOHRU pour la phase de contrôle sont suffisamment robustes pour sortir de leur plage de calage et garder leur capacité à représenter correctement l'écoulement à l'exutoire du bassin versant. Ces modélisations peuvent, en fin de compte, être utilisées en mode prédictif.

Une analyse plus attentive du tableau montre la bonne tenue des critères statistiques et la robustesse de la modélisation TOLOHRU. Cette modélisation permet d'obtenir globalement une bonne connaissance de la réaction hydrologique du bassin en fonction d'une pluviométrie identifiée. Elle a aussi l'avantage de considérer le plus grand nombre d'HRU et donc de mieux tenir compte des caractéristiques biophysiques du bassin versant. Aussi, l'étude de la variation des termes du bilan en eau provoquée par la mise en place de différents scénarios de développement dans le bassin versant sera basée sur le bilan en eau simulé par SWAT via la modélisation TOLOHRU.

### III-8.5 TERMES DU BILAN EN EAU

Le tableau III-62 compare les valeurs des termes du bilan en eau entre les modélisations TOLOFI, TOLOMAT, TOLO3A et TOLOHRU.

**TABLEAU III-62: comparaison entre les valeurs des termes annuels moyens du bilan en eau des modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 et TOLO3A sur la période de 1977 à 1980 – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Écoulement total (1) (mm)
TOLOFI	1.214	771	398	44	44	442
TOLOMAT	1.214	767	399	33	33	431
TOLO3A	1.360	805	536	13	14	549
TOLOHRU	1.214	756	446	8	8	454

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

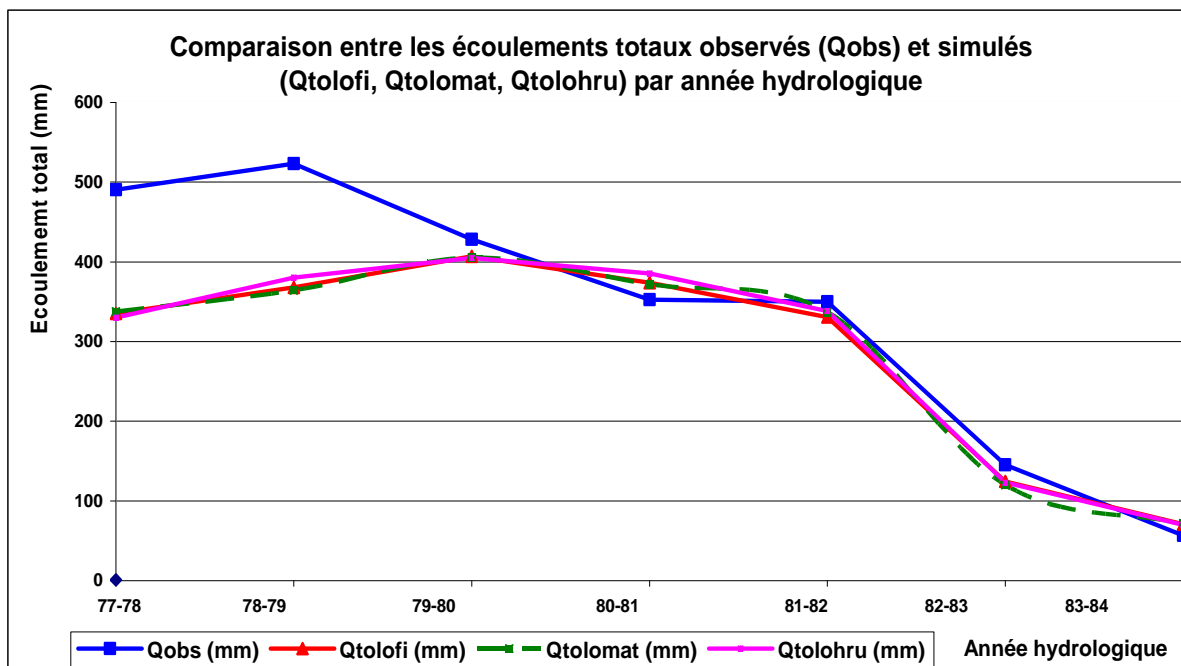
On constate que, pour une même quantité annuelle moyenne de précipitations, le découpage en un plus grand nombre d'unités hydrologiques (TOLOHRU) provoque la diminution d'ETR et de la percolation. Cette comparaison ne tient pas compte des résultats obtenus via TOLO3A, car la quantité annuelle moyenne de précipitations est calculée sur trois ans au lieu de huit. Tripathi (2006) a montré que la subdivision du bassin influence bien l'évapotranspiration et la percolation.

L'écoulement total à l'exutoire estimé via TOLOHRU est légèrement supérieur aux autres modélisations, augmentant de 3% par rapport à la modélisation TOLOFI et de 5% par rapport à TOLOMAT. De nouveau, cette comparaison ne tient pas compte de la modélisation TOLO3A vu la quantité annuelle moyenne différente de précipitations. Muleta et al. (2007), en étudiant le bassin de Big Creek aux Etats-Unis, ont montré que le débit est relativement peu sensible à la discrétisation spatiale du bassin.

Par contre, nous constatons que la répartition de l'écoulement total entre ses composantes principales (SURF\_Q, LAT\_Q et GW\_Q) est sensible à l'échelle de la discrétisation spatiale. Ce constat serait dû à la désagrégation des paramètres CN et à une plus grande influence de l'hétérogénéité des unités de sol et de végétation présentes dans le bassin. L'écoulement de base diminue au profit du ruissellement et de l'écoulement hypodermique. Cette diminution du signal saisonnier correspond à un tarissement plus rapide de l'écoulement de la rivière durant les mois de septembre à mars constaté auparavant en comparant visuellement les courbes de récession entre l'hydrogramme observé et simulé.

### III-8.6 HYDROGRAMMES ANNUELS ET MENSUELS

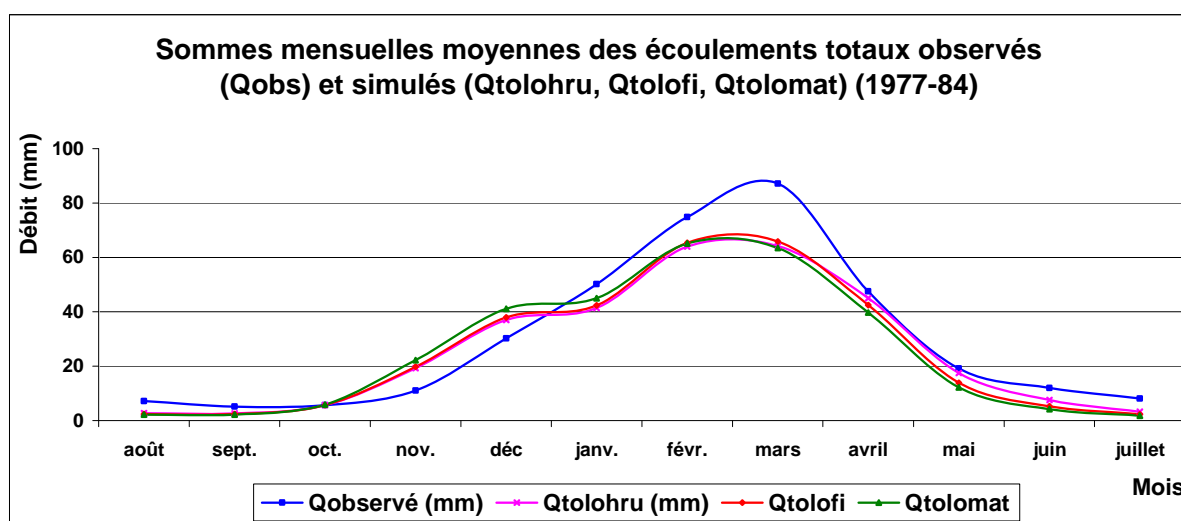
La comparaison entre l'écoulement total annuel observé et simulé par SWAT via les trois modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU est donnée sur le graphique de la figure III-81 sur la période de 1977 à 1984 (années hydrologiques).



**FIGURE III-81: comparaison entre les sommes annuelles des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ,  $Q_{tolomat}$ ,  $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

La comparaison entre l'écoulement total annuel observé et les écoulements totaux annuels simulés par SWAT via les trois modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU montre une tendance similaire avec la sous-estimation des écoulements estimés vis-à-vis des écoulements observés. Plusieurs raisons ont été évoquées telles que la qualité des données débitométriques observées et la possible sur-estimation d'ETR.

La comparaison entre l'écoulement total mensuel moyen observé et les écoulements totaux mensuels simulés par SWAT via les trois modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU est donnée sur le graphique de la figure III-82 sur la période de 1977 à 1984.



**FIGURE III-82: comparaison entre les sommes mensuelles moyennes des écoulements totaux observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolohru}$ ,  $Q_{tolomat}$ ,  $Q_{tolofi}$ ) aux dates correspondantes par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

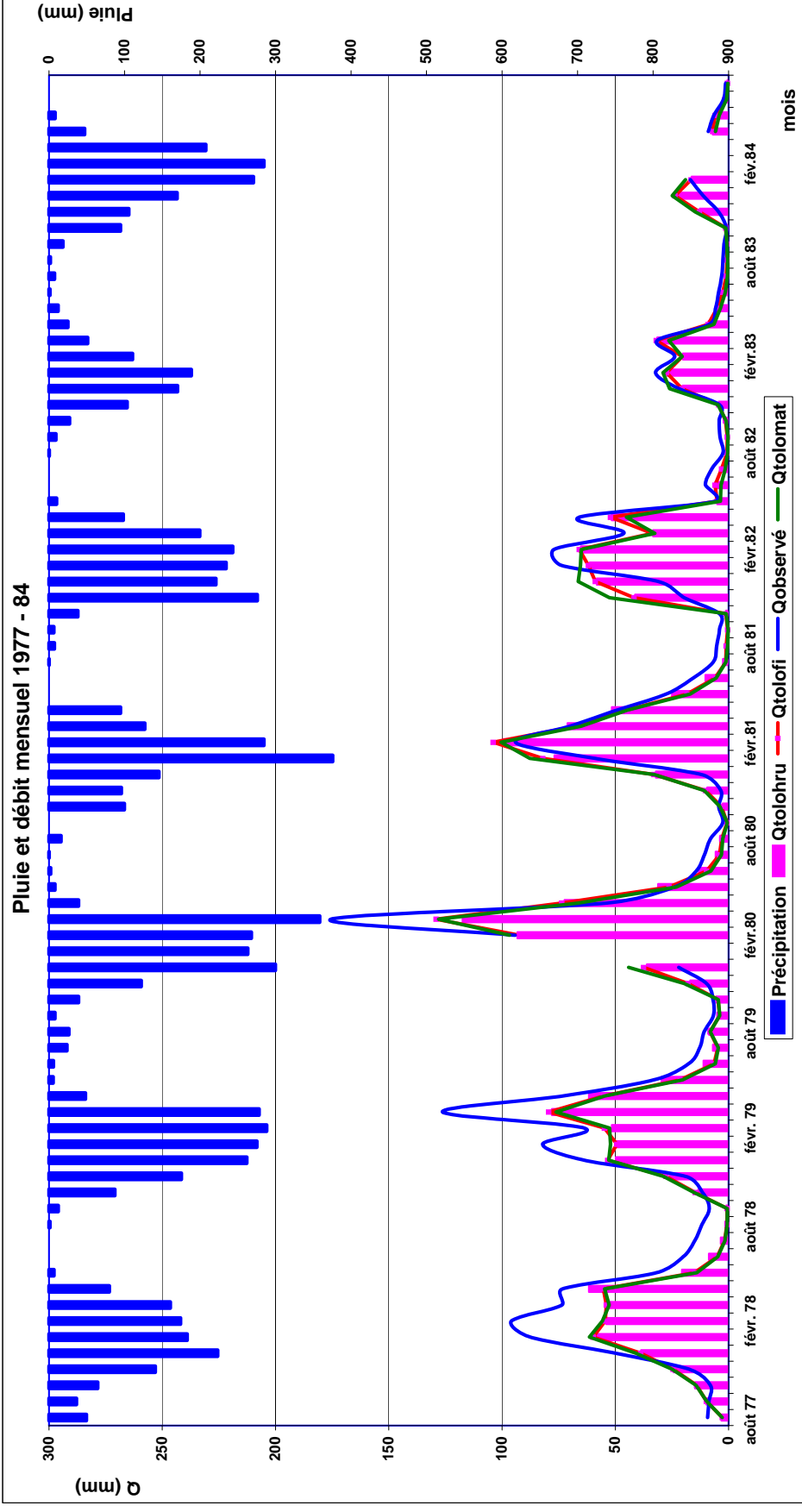
On remarque la différence d'ordre de grandeur entre simulations et mesures pour toutes les modélisations. La répartition mensuelle de la lame d'eau écoulée à l'exutoire est très semblable pour les trois modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU.

### **III-8.7 HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES**

Le graphique de la figure III-83 compare les hydrogrammes partiels du total mensuel des débits disponibles ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ,  $Q_{tolomat}$  et  $Q_{tolohru}$ ) pour les mêmes dates avec l'histogramme des précipitations mensuelles sur la période d'août 1977 à juillet 1984.

On observe que les débits simulés de toutes les modélisations ont pratiquement la même correspondance chronologique avec l'histogramme des pluies et, du point de vue de l'amplitude, sous-estiment de la même manière la quantité d'eau à l'exutoire, plus particulièrement durant les premières années hydrologiques. En plus des causes déjà mentionnées, ajoutons la difficulté pour SWAT de tenir compte des climats et microclimats trouvés dans le bassin versant ainsi que l'utilisation des données journalières de pluie qui peut masquer les fortes intensités de pluie et affecter la simulation du ruissellement.

Enfin, les débits mesurés doivent être pris avec prudence et les résultats obtenus de l'estimation des termes du bilan hydrique via les différentes modélisations considérés avec certaines réserves. Pour augmenter la corrélation entre les données observées et simulées et améliorer la performance du modèle, il est nécessaire de disposer de séries de données complètes et de bonne qualité, entre autres des données débitométriques observées. Dans ce contexte, nous insistons sur la similitude annuelle et interannuelle entre les dynamiques simulées et mesurées du fonctionnement hydrologique plutôt que sur la proximité des valeurs absolues des débits.



**FIGURE III-83:** évolution temporelle du total mensuel des débits disponibles observés ( $Q_{obs}$ ) et simulés ( $Q_{tolofi}$ ,  $Q_{tolomat}$  et  $Q_{tolohru}$ ) pour les mêmes dates à l'exutoire et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa

### III-8.8 RENDEMENT EN SEDIMENT

Le tableau III-63 compare les résultats simulés des rendements moyens annuels en sédiment SYLD par sous-bassin et HRU entre les modélisations TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 et TOLO3A sur la période de 1977 à 1980.

**TABLEAU III-63: comparaison entre les rendements annuels moyens en sédiment SYLD par sous-bassin et HRU simulés via TOLOFI, TOLOMAT et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 et TOLO3A sur la période de 1977 à 1980 - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	HRU	SYLD annuel			
		TOLOFI (t/ha)	TOLOMAT (t/ha)	TOLO3A (t/ha)	TOLOHRU (t/ha)
TolomosaA	WPAS/LEDB(2)	0,8	2,7	3,1	--
	WPAS/JDER(2)	--		--	2,7
	WPAS/LEDK	--		--	0,9
	AGRC/JDER(2)	--		--	8
Mena	WPAS/LEDB	44,7	200,5	83,8	--
	PAST/LEDB(3)	--		--	0,1
	WPAS/JCHX	--		--	0,1
	WPAS/LEDK	--		--	0,8
Sola	PAST/IGFA	1,6	1,6	2,1	0,1
Pinos	PAST/LEDB(2)	0,8	3,8	4,2	0,01
Bassin		7,8	32,8	15,3	1,5

(du fichier TXTINOUT, output SBC)

On constate que les valeurs simulées du rendement en sédiment sont assez dispersées et que seul le résultat de la modélisation TOLO3A se rapproche le plus de celui obtenu des bathymétries (14,5 t/ha/an). La valeur élevée du rendement en sédiment estimée via TOLOMAT pourrait être due aux valeurs des CN issues de la matrice qui favorisent le ruissellement de surface. Certaines valeurs très élevées du rendement en sédiment restent difficilement explicables.

Le modèle de Wischmeier (1978), développé de manière empirique à partir de nombreuses données de parcelles cultivées aux Etats-Unis, présente certaines limites à son applicabilité dans des conditions différentes de celles où il a été élaboré. Son application à d'autres sites semble délicate pour faute de validation et souvent contestée quant à la validité de ses résultats (Nearing et al., 1994).



## **QUATRIEME PARTIE**

### **ALLOCATION ET VALORISATION DES RESSOURCES HYDRIQUES DE SCENARIOS DE DEVELOPPEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE TOLOMOSA**



## IV-1 TECHNIQUES DE VALORISATION

En traitant de l'environnement et des ressources naturelles, on peut reconnaître deux grands paradigmes<sup>1</sup>. Le paradigme économique se concentre sur l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles dans un procédé de production pour satisfaire des besoins humains; dans cette perspective, seules les ressources naturelles utiles aux humains ont une valeur. Le paradigme écologique par contre considère la durabilité (santé et survie) et vise à l'équilibre à long terme des écosystèmes vivants.

A l'heure actuelle, vu les pénuries croissantes de l'eau et de la concurrence exacerbée entre l'usage industriel, agricole et domestique, des propositions sont faites pour créer un véritable marché de l'eau considérée comme un bien de consommation échangeable<sup>2</sup> permettant de réorienter son usage vers des utilisations à haute valeur ajoutée, par exemple de l'agriculture irriguée vers l'horticulture ou du secteur rural en général aux secteurs industriels et urbains.

### IV-1.1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

A partir des années 80, on trouve dans la littérature scientifique un grand nombre d'études de valorisation économique des services environnementaux fournis par un bassin versant, utilisant différentes techniques. La fonction des prix hédoniques et de la fonction de production sont deux techniques largement employées pour la valorisation de biens environnementaux depuis une vingtaine d'années (Turner et al., 2004; Aylward, 2002; Barzev, 2002; Matthews, 2001; Rogers, 1998; UNEP, 1994; Dixon et al., 1990).

Cependant, peu de travaux se consacrent à l'étude de la relation entre le changement de couverture végétale dû à un scénario de développement dans un bassin versant et son impact sur les termes du bilan hydrique (Aylward, 2002; Calder, 2002; Miller, 2002; UNEP, 1994; North, 1993; Bosch, 1982). La plupart des études disponibles analysent l'impact hydrologique d'une variation de la couverture forestière. Gassman et al. (2007) rapportent un certain nombre d'études de scénarios affectant le bilan hydrologique modélisé par SWAT. Parmi celles-ci, Miller et al. (2002) analysent l'impact des changements historiques du land use du bassin versant San Pedro (Arizona) et Cannonsville (New York) sur les débits simulés par SWAT. Hernandez et al. (2002) utilisent SWAT pour prédire des changements de land use sur le bilan d'un sous-bassin du bassin San Pedro. Heuvelmans et al. (2005) étudient, dans le cadre de la réduction d'émission de CO<sub>2</sub>, l'impact d'un changement de land use sur l'érosion et les débits dans le bassin versant de Meerdaal et Latem (Belgique). L'impact de la forêt et d'autres occupations des terres sur le ruissellement sont analysés par Lorz et al. (2007) dans le cadre d'une comparaison avec trois autres modèles. L'impact hydrologique d'autres occupations hypothétiques des terres est rapporté par Foher et al. (2002, 2004).

Un nombre restreint d'études utilise le modèle hydrologique SWAT en combinaison avec un logiciel économique comme interface pour simuler l'impact de l'application de scénarios de gestion sur un bassin versant (Gassman et al., 2007; Turpin et al., 2005; Whittaker et al., 2003; Gassman et al., 2002; Lemberg et al., 2002; Attwood et al., 2000; Qiu et al., 1998).

### IV-1.2 METHODOLOGIE

Les ressources en eau peuvent être considérées comme un capital naturel non marchand qui fournit un flux de biens et services. La clef pour l'évaluation de la valeur économique de ces ressources est l'établissement d'une fonction qui lie les flux hydriques avec les biens et les services fournis qui ont une valeur pour la société.

En économie de l'environnement, la valeur économique totale d'une ressource ou bien environnemental comprend les bénéfices directs, les bénéfices indirects et la valeur de non-usage (Turner et al., 2004; Rogers et al., 1998). Comme il n'existe actuellement aucune donnée sur les bénéfices indirects et la valeur de non-usage pour le bassin versant, cette étude se limite à la première composante de la valeur économique totale qui regroupe la valeur des bénéfices directs de l'utilisation de l'eau.

---

<sup>1</sup> Un paradigme est une vision qui correspond à un certain ensemble de valeurs et de principes

<sup>2</sup> *Commodity*

Dans un marché concurrentiel, les individus exercent leur choix en comparant leur consentement à payer<sup>1</sup> avec le prix du produit. Ils achètent le bien quand ce consentement à payer excède le prix. L'essence du processus de valorisation économique d'un bien implique alors de trouver une mesure de ce consentement à payer pour une quantité ou qualité d'un bien environnemental dans les circonstances où les marchés n'indiquent pas cette information directement. L'unité monétaire est utilisée comme barre de mesure, car elle s'avère être une manière simple d'exprimer le consentement à payer et permet la comparaison entre les variables liées à l'environnement et les variables liées au marché.

Comme le consentement à payer ne peut pas être évalué à partir d'observations directes sur les transactions de ces biens non marchands (pas de marché), deux approches sont utilisées qui supposent que le consommateur/acheteur, rationnel dans son choix entre différents biens marchands, se comporte de la même manière à l'égard des biens non marchands (Turner et al., 2004; Dixon, 1990):

- Estimation directe de la valeur du bien à partir d'observations du comportement des individus sur les marchés, ou à partir de réponses à des questionnaires sur des situations hypothétiques.
- Estimation indirecte de la valeur du bien basée sur des relations hypothétiques entre les demandes observables pour des biens marchands et demandes non observables pour des biens et services environnementaux non marchands.

L'expérience locale a montré que la méthode d'estimation directe est coûteuse et difficilement applicable. Les individus généralement se refusent à répondre aux questions ou donnent des réponses qui ne sont pas toujours en relation avec la question posée, ce qui souligne aussi la difficulté de formuler des questions pour obtenir une réponse claire (Brezó, 2002). Aussi, vu ces problèmes et tenant compte de la contrainte budgétaire, l'étude utilise l'approche indirecte pour imputer une valeur monétaire sur des biens environnementaux. Cette approche permet d'écartier la subjectivité et les incertitudes propres aux questionnaires utilisés.

En fonction des données disponibles, deux techniques sont envisagées par l'étude pour attribuer une valeur monétaire à un bien environnemental: celle des prix hédoniques d'une propriété agricole du bassin versant et celle de la fonction de production hydroénergétique à partir des eaux du réservoir de San Jacinto.

#### **IV-1.3 EFFET SUR LE BILAN EN EAU**

Le développement du bassin versant de la Tolomosa a pour but d'augmenter la productivité économique d'une unité de terrain grâce à des changements dans l'occupation des terres. Parmi les nombreuses incidences environnementales et économiques issues d'une variation du land use d'un bassin, l'étude se concentre sur l'impact d'un changement de l'occupation des terres sur les termes du bilan en eau (variation quantitative), en termes des rendements en sédiment (variation qualitative) et, enfin, en termes économiques à travers une allocation productive de l'eau et sa valorisation.

Un modèle hydrologique est un outil efficace pour évaluer l'effet d'un changement du land use dû à une décision politique ou à des incitants économiques (Foher et al., 2002). Comme précité lors de la justification du choix du modèle, SWAT est capable d'intégrer l'impact des changements de l'occupation des terres dans la modélisation du bilan en eau d'un bassin versant.

Les comportements hydrologiques dus aux changements d'occupation des terres sont analysés mensuellement et annuellement et les valeurs des différents flux comparées entre elles. Les paramètres de la modélisation TOLOHRU du bilan en eau de la situation actuelle du bassin (confer point III-7) sont utilisés pour l'établissement des nouveaux bilans en eau lors de l'application des programmes de développement.

---

<sup>1</sup> *Willingness to pay*

## IV-1.4 TECHNIQUES D'APPROXIMATION

### IV-1.4.1 FONCTION HEDONIQUE

La méthode dite hédonique d'évaluation marchande de biens différenciés<sup>1</sup> utilise la différence de prix entre des biens de marché pour dériver la valeur des caractéristiques environnementales et repose sur le constat que les différents biens qui sont échangés sur les marchés ne sont pas recherchés pour eux-mêmes, mais pour des caractéristiques quantifiables qui les définissent (Rosen, 1974).

L'équilibre du marché hédonique est obtenu sur base d'un marché concurrentiel, à travers les mécanismes d'optimisation développés individuellement par l'acheteur et le vendeur qui se comportent de manière rationnelle et les contraintes respectives de revenus et coûts. La méthode suppose aussi que le prix du bien reflète bien la valeur de l'ensemble des caractéristiques de ce bien.

Le bien échangé est une propriété agricole située dans le bassin versant de la Tolomosa. L'approche hédonique n'est valable que si l'acheteur/agriculteur perçoit également les caractéristiques environnementales du bien, même implicitement. L'agriculteur/acheteur est, par exemple, parfaitement conscient de l'importance de la qualité de l'eau pour sa production agricole.

L'objectif est de révéler les différentes caractéristiques qui expliquent le prix de la propriété agricole et de déterminer le prix implicite de chaque caractéristique.

Pour obtenir la forme fonctionnelle de l'équation hédonique, nous devons d'abord résoudre deux questions: celle de la détermination des variables explicatives (ou caractéristiques) et celle de l'identification de la forme fonctionnelle la plus adéquate. Le bien en question est composé de différentes caractéristiques ou attributs, les uns de marché et les autres hors marché (Barzev, 2002). Le prix référence établi par la fonction hédonique est fonction d'un ensemble de caractéristiques liées à des attributs environnementaux (matrice X) et aux caractéristiques structurelles (matrice Z). La fonction de prix se représente sous la forme générale suivante:

$$P = P(X, Z)$$

avec:

P: prix du terrain agricole

X = (x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>,...x<sub>n</sub>): matrice (ou jeu de variables) qui représente les propriétés environnementales du bien et de l'entourage

Z = (z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>,...z<sub>n</sub>): matrice (ou jeu de variables) qui représente les caractéristiques structurelles propres au bien

Le choix de l'approximation de la fonction des prix hédoniques est évidemment de toute première importance. On a tenté de ne pas trop contraindre a priori la relation entre le prix du terrain et ses caractéristiques retenues ou variables pertinentes et d'admettre le plus grand nombre de cas de figures possibles. L'intérêt de spécifier une fonction hédonique flexible est d'autoriser des non linéarités dans la relation entre le prix du terrain et les caractéristiques qui le définissent<sup>2</sup>.

Comme on suppose qu'il existe une relation entre les prix des terrains agricoles de chaque sous-bassin, une seule équation est établie pour l'ensemble du bassin versant de la Tolomosa. Une équation par sous-bassin réduirait sensiblement la taille de l'échantillon et le nombre de degrés de liberté. Aucun élément ne nous permet a priori de définir le type de transformation fonctionnelle à utiliser pour représenter la fonction hédonique.

Parmi les transformations fonctionnelles de la fonction hédonique, nous supposons tout d'abord une transformation du type Box-Cox sans restriction sur les paramètres  $\theta$  et  $\lambda$ . Ceci permet d'estimer les valeurs de  $\theta$  et  $\lambda$  et de calculer un intervalle de confiance pour ces derniers. Ensuite, nous simplifions le modèle en testant la Box-Cox générale restreinte où les paramètres sont considérés comme égaux entre eux et, enfin, la forme double logarithmique où les exposants  $\theta$  et  $\lambda$  peuvent être considérés comme conjointement nuls. En effet, étant donné que les intervalles de confiance ont des

---

<sup>1</sup> Hedonic property pricing

<sup>2</sup> Par exemple, un mètre cube d'eau supplémentaire journalier pour un terrain qui possède déjà une source n'augmente pas la valeur du terrain du même montant qu'un mètre cube d'eau supplémentaire journalier pour un terrain sans source d'eau

intersections et contiennent la valeur zéro, ces deux dernières simplifications peuvent être considérées comme possibles. Le tableau IV-1 résume les trois transformations fonctionnelles.

**TABLEAU IV-1: formes fonctionnelles de l'équation hédonique, paramètres de transformation Box-Cox et restrictions**

Forme fonctionnelle	Spécification	Paramètre Box-Cox estimé	Restriction
Box-Cox générale	(1)	Estimation de $\theta$ et $\lambda$	Aucune
Box-Cox générale restreinte	(2)	Estimation de $\theta$ et $\lambda$	$\theta = \lambda$
Log-Log	(3)	Aucun	$\theta = \lambda = 0$

Le prix du bien échangé sur le marché s'interprète comme la rémunération qu'accorde le marché à certaines caractéristiques structurelles d'une part et, d'autre part, à des éléments n'ayant jamais fait l'objet de transaction marchande comme telle. La relation est alors du type suivant:

$$P_i^{(\theta)} = \alpha + \sum_j \beta_j X_{ij}^{(\lambda)} + \sum_i \beta_j Z_{ij} + \varepsilon_i$$

avec:

P: prix du terrain agricole

X: variables qui représentent les propriétés environnementales du bien

Z: variables qui représentent les caractéristiques structurelles propres au bien

et:

$$P_i^{(\theta)} = (P_i^{(\theta)} - 1)/\theta \text{ si } \theta \neq 0 \text{ et } P_i^{(\theta)} = \ln(P_i) \text{ si } \theta = 0.$$

$$X_{ij}^{(\lambda)} = (X_{ij}^{(\lambda)} - 1)/\lambda \text{ si } \lambda \neq 0 \text{ et } X_{ij}^{(\lambda)} = \ln(X_{ij}) \text{ si } \lambda = 0$$

Dans cette formulation entre le prix du terrain et les caractéristiques retenues, les exposants  $\lambda$  et  $\theta$  doivent être estimés. Si ces deux exposants sont égaux à un, une forme linéaire peut être estimée. S'ils sont tous les deux nuls, on considère la forme double logarithmique. Si un des deux est égal à zéro et l'autre est égal à l'unité, on aura soit une forme logarithmique-linéaire (dans le cas où  $\theta = 1$  et  $\lambda = 0$ ) ou linéaire-logarithmique (dans le cas où  $\theta = 0$  et  $\lambda = 1$ ). Ces paramètres peuvent prendre d'autres valeurs que ces cas simples et mener à une estimation non linéaire (quadratique, cubique, etc.). A la fois pour des raisons liées à l'omission de caractéristiques et aux nécessités du traitement statistique, il est impossible de connaître avec certitude la véritable fonction de prix. Pour arriver à une estimation empirique, on postule une approximation de cette fonction avec une erreur de mesure destinée à capturer l'effet des caractéristiques omises et de l'écart entre la vraie fonction et son approximation. On supposera typiquement que cette erreur de mesure résulte de tirages indépendants d'une observation à l'autre d'une loi de distribution connue (loi Gaussienne).

#### IV-1.4.2 FONCTION DE PRODUCTION

Dans le cas de l'unité productive d'hydroélectricité de San Jacinto, la quantité de la ressource eau disponible basée sur la simulation du bilan hydrique du bassin versant est un facteur d'une fonction de production qui génère un bénéfice par la vente du kWh produit. Une détérioration ou variation de la matrice environnementale (termes du bilan en eau) peut provoquer une variation de la production hydroénergétique.

Comme dans le cas des prix hédoniques, l'estimation de la forme fonctionnelle passe par la résolution préalable de deux questions, celles de la détermination des variables explicatives ou pertinentes et celle du choix de la forme fonctionnelle de l'équation. La fonction de production peut s'écrire de la manière suivante:

$$E = f(K, W, q)$$

avec:

E: quantité produite du bien final

K: quantité du capital pour produire E

W: quantité de travail pour produire E

q: ressource environnementale pour produire E

## IV-1.5 CHOIX DU LOGICIEL D'ANALYSE ECONOMETRIQUE

La version simplifiée du logiciel LIMDEP7 est choisie pour établir les formes fonctionnelles des équations de régression et leur analyse économétrique<sup>1</sup> (Greene, 2002). Ce logiciel est considéré comme une référence et est d'un emploi très répandu. Il incorpore aussi l'analyse économétrique de variables dichotomiques. De plus, il a été diffusé grâce au cours de formation organisé par l'INIBREH en 2005 et est aussi disponible à la Faculté des Sciences économique de l'Université autonome Juan Misael Saracho (UAJMS) à Tarija..

## IV-2 BASE DE DONNEES COMPLEMENTAIRES

Les sources d'informations disponibles sont la base de données biophysiques du bassin élaborée précédemment pour la modélisation des termes du bilan en eau.

Comme la valeur d'un terrain agricole dépend aussi de l'aptitude des terres et de sa pente, la base existante de données a dû être complétée. Elle comprend aussi les registres de transactions et les caractéristiques des propriétés sélectionnées et la valeur de la production hydroénergétique du Projet Multiple de San Jacinto.

### IV-2.1 CARTES D'APTITUDE DES TERRES

#### IV-2.1.1 METHODOLOGIE

L'aptitude d'une terre est la capacité (ou potentiel) de production que possède cette ressource (terre) pour un type d'utilisation défini ou une activité précise, telle que l'agriculture, l'élevage ou la foresterie, de manière durable et en tenant compte de l'ensemble des contraintes ou des exigences biophysiques nécessaires à cette activité. Elle est donc spécifique à un endroit du bassin (régionalement dépendante) et dépend des techniques utilisées.

Les données nécessaires à la classification des terres selon leurs aptitudes proviennent de l'information secondaire existante (Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente, 2005; PEA, 2004; Zonisig (a&b), 2001; Agrosig, 2001; Alzérreca et al., 1999; Pérez, 1985), de la carte géomorphologique et des sols établies précédemment et des données obtenues lors des sorties de terrain.

Comme type d'utilisation des terres dans le bassin versant de la Tolomosa, l'étude considère:

- Utilisation agricole: cultures traditionnelles intensives ou extensives (pomme de terre, maïs et légumes), avec de petites quantités d'intrants; la main-d'œuvre est principalement familiale et la force motrice est de type manuel ou animal.
- Utilisation pastorale: élevage extensif de bovins ou ovins sur des prairies naturelles, avec très peu d'investissements en capital pour l'exploitation (y compris les points d'eau), pas ou peu de gestion ou d'amélioration foncière. Pas de contrôle de la charge animale par hectare. Les races sont locales ou hybrides et les pratiques sanitaires et de reproduction dépendent des connaissances des éleveurs. Pas d'amélioration génétique.
- Utilisation forestière: plantation d'essences locales à des fins sylvo-pastorales ou productives (bois de construction; bois de chauffe; charbon de bois). Une fois la plantation établie, l'entretien et la main-d'œuvre sont négligeables.

La qualité d'une terre est définie par un ensemble d'attributs ou de caractéristiques qui permettent de prévoir son comportement face à des utilisations déterminées. Elle reflète les caractéristiques prédominantes qui permettent de définir la classe d'aptitude à laquelle elle appartient. L'étude considère que, dans la pratique, les types d'utilisation de la terre sélectionnés se réduisent aux altitudes inférieures à 3.500 m. La nécessité de certaines caractéristiques spécifiques provient du type d'utilisation considéré ou préconisé. Dans le cas où une unité possède une qualité définie par plusieurs caractéristiques, la caractéristique la plus restrictive est celle qui détermine le niveau de qualité. Enfin, il est évident que l'évaluation des terres ne peut être complètement quantifiée (Rossiter, 1994).

---

<sup>1</sup> Rappelons que l'économétrie est une branche de l'économie qui a pour objectif de permettre de confronter des théories économiques à des données réelles

L'étude utilise le programme ALES (Système Automatisé pour l'Evaluation des Terres) pour l'évaluation de l'aptitude des terres dans le bassin (Rossiter et al., 1995). Dans ce programme, les classes d'aptitudes des terrains sont évaluées sur base d'arbres de décisions avec un système de décision type expert. La particularité du programme est de ne pas apporter d'informations en soi (liste de caractéristiques de la terre par exemple), mais demande à l'analyste de définir les caractéristiques selon les données disponibles. En d'autres mots, le choix des niveaux de décision et les résultats obtenus reflètent l'expérience locale sur la relation liant la terre à son utilisation et permettent de mettre l'accent plus sur les connaissances que sur des données souvent peu denses ou dignes de confiance.

Les arbres de décisions où sont développées les conditions d'utilisation possible des terres (pour l'agriculture, l'élevage et la foresterie) ainsi que les limites de chaque niveau ont été élaborés pour le département de Tarija par Zonisig (a) (2001). Soulignons que le but de cette étude n'est pas d'obtenir une classification exhaustive pour un projet concret de mise en valeur avec un seul mode d'utilisation, mais plutôt pour des objectifs généraux de mise en valeur du bassin versant sous forme de scénarios de type agricole, sylvicole ou pastoral.

L'unité cartographique prise en considération par l'étude pour l'analyse de la qualité de la terre est l'unité géomorphologique considérée comme une unité homogène en fonction de ses caractéristiques principales (confer tableau I-7). La carte d'aptitude est alors le produit de la classification de la carte géomorphologique (et donc des sols) en fonction des résultats de l'évaluation de la qualité par le programme ALES pour l'utilisation considérée. Une classe d'aptitude pour une utilisation définie correspond alors à une ou plusieurs unités géomorphologiques spécifiques en fonction de ses qualités rencontrées.

#### **IV-2.1.2 APTITUDE DE LA TERRE**

##### **IV-2.1.2.1 Classes d'aptitude**

Les classes d'aptitude utilisées dans l'étude sont celles définies par la FAO (1976):

- Classe I: aptitude élevée. Terres n'ayant pas de limitations sérieuses pour un certain type d'utilisation, ou seulement des limitations mineures qui ne peuvent réduire sensiblement la productivité ou les avantages et ne demandent pas l'accroissement des intrants au-delà d'un niveau acceptable.
- Classe II: aptitude moyenne. Terres présentant un ensemble de limitations moyennement sérieuses à un certain mode d'utilisation; ces limitations réduiraient la productivité ou les profits et augmenteraient les intrants nécessaires, de sorte que les avantages globaux, bien qu'intéressants, sont sensiblement inférieurs à ceux de la classe I.
- Classe III: aptitude marginale. Terres présentant un ensemble de limitations sérieuses à un mode d'utilisation donné; ces limitations réduiraient la productivité ou les profits de telle sorte que la dépense ne se justifierait plus que marginalement.
- Classe IV: inapte. Terres ayant des limitations très sérieuses qui semblent interdire toute possibilité de réussite de telle ou telle utilisation.

##### **IV-2.1.2.2 Classes d'aptitude du bassin versant**

La définition des aptitudes agricoles pastorales et sylvicoles en fonction des différentes caractéristiques du bassin est détaillée à l'annexe IV-1.

Les différentes qualités de la terre prises en compte pour juger de l'aptitude en fonction d'un usage agricole, pastoral ou sylvicole du sol sont résumées dans le tableau IV-2.

**TABLEAU IV-2: qualités retenues par utilisation agricole, pastorale et forestière de la terre considérée (Zonisig(b), 2001)**

Qualités de la terre	Usage agricole	Usage pastoral		Usage forestier	
		Prairie permanente (1)	Prairie naturelle	Forêt naturelle	Forêt plantée
Absence de salinité dans le sol	x	x			x
Absence de sodium dans le sol	x	x			x
Disponibilité en eau du sol	x	x			x
Disponibilité en oxygène du sol	x	x			x
Absence de risque à l'inondation	x	x			x
Résistance à l'érosion hydrique	x	x		x	x
Profondeur effective du sol	x	x			x
Période sans gel	x	x			x
Adaptation du bétail à l'altitude		x	x		
Qualité du fourrage			x		
Possibilité de parcours du bétail			x		
Disponibilité de fourrage frais			x		
Type de couverture végétale			x		
Disponibilité de bois commercial				x	x

(1) Prairies semées qui sont ensuite gérées de la même manière que les prairies naturelles.

En analysant le tableau IV-2, on observe que les qualités de la terre requises pour un usage forestier sont très proches de celles pour un usage agricole.

#### IV-2.1.3 APTITUDE AGRICOLE

La superficie des classes d'aptitude agricole trouvées dans le bassin versant est indiquée dans le tableau IV-3.

**TABLEAU IV-3: surface exprimée en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude agricole - Bassin de la Tolomosa**

Classe/aptitude		Superficie	
		(ha)	(% du B V)
II	Moyenne	2.694	6
III	Marginale	5.816	13

On remarque que seulement 6% du bassin versant possèdent des terres agricoles de classe moyenne. La représentation des unités classées et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure IV-1.

#### IV-2.1.4 APTITUDE PASTORALE

##### IV-2.1.4.1 Elevage extensif d'ovins

La superficie des classes d'aptitude pastorale pour l'élevage extensif d'ovins dans le bassin versant est indiquée dans le tableau IV-4.

**TABLEAU IV-4: superficies exprimées en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude pour l'élevage extensif d'ovins - Bassin de la Tolomosa**

Classe/aptitude		Superficie	
		(ha)	(% du

			<b>B V)</b>
II	Moyenne	6.839	16
III	Marginale	8.298	19

On remarque que seulement 16% du bassin sont aptes à l'élevage extensif d'ovins. La représentation des unités classées et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure IV-2.

#### **IV-2.1.4.2 Elevage extensif de bovins**

La superficie des classes d'aptitude pastorale pour l'élevage extensif de bovins dans le bassin versant est indiquée dans le tableau IV-5.

**TABLEAU IV-5: superficies exprimées en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude pour l'élevage extensif de bovins – Bassin de la Tolomosa**

Classe/aptitude		Superficie	
		(ha)	(% du B V)
III	Marginale	14.238	33

On remarque qu'il n'existe pas de terres aptes à l'élevage extensif de bovins. La représentation des unités classées et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure IV-3.

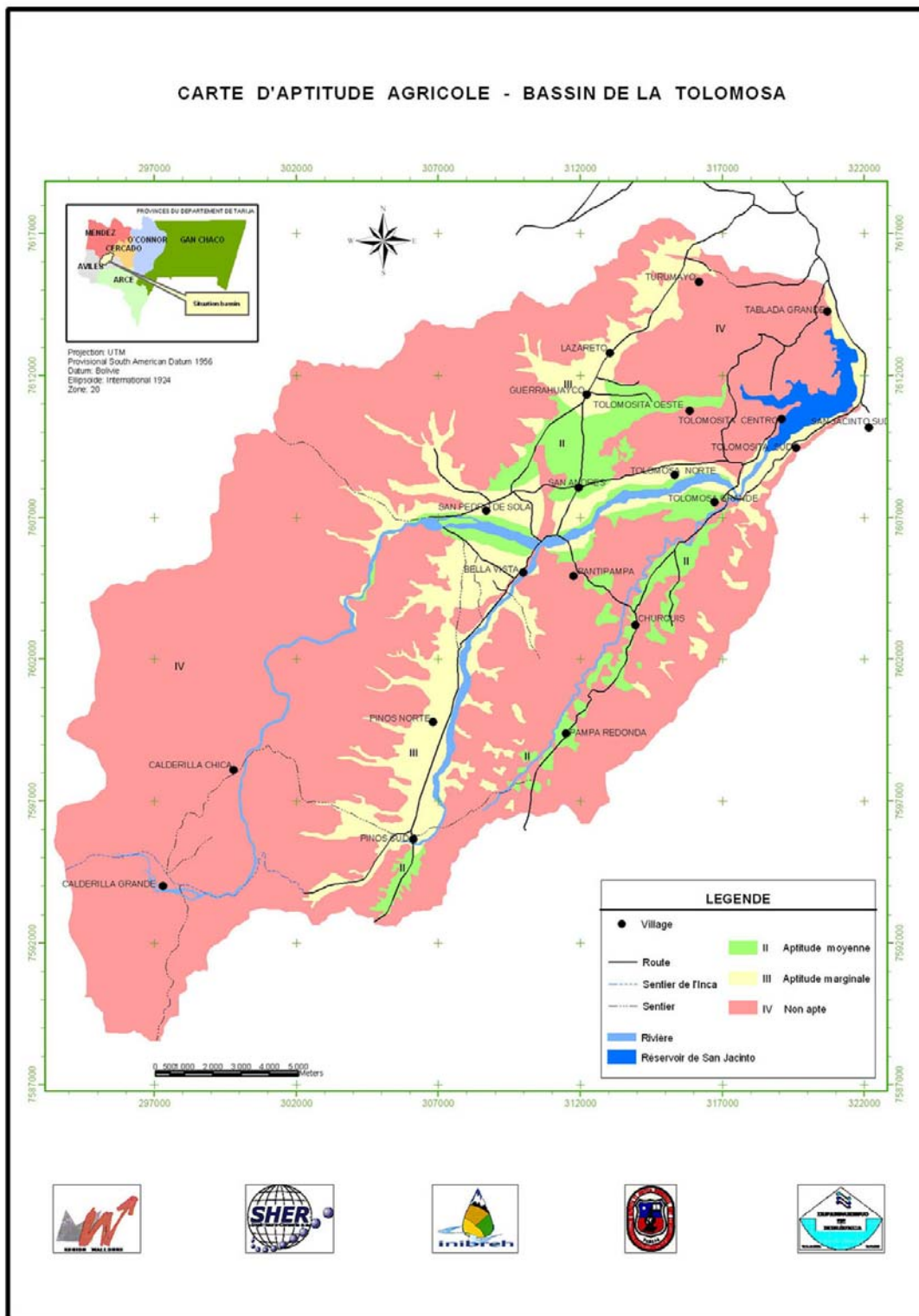
#### **IV-2.1.5 APTITUDE SYLVICOLE**

La superficie des classes d'aptitude forestière du bassin versant est indiquée dans le tableau IV-6.

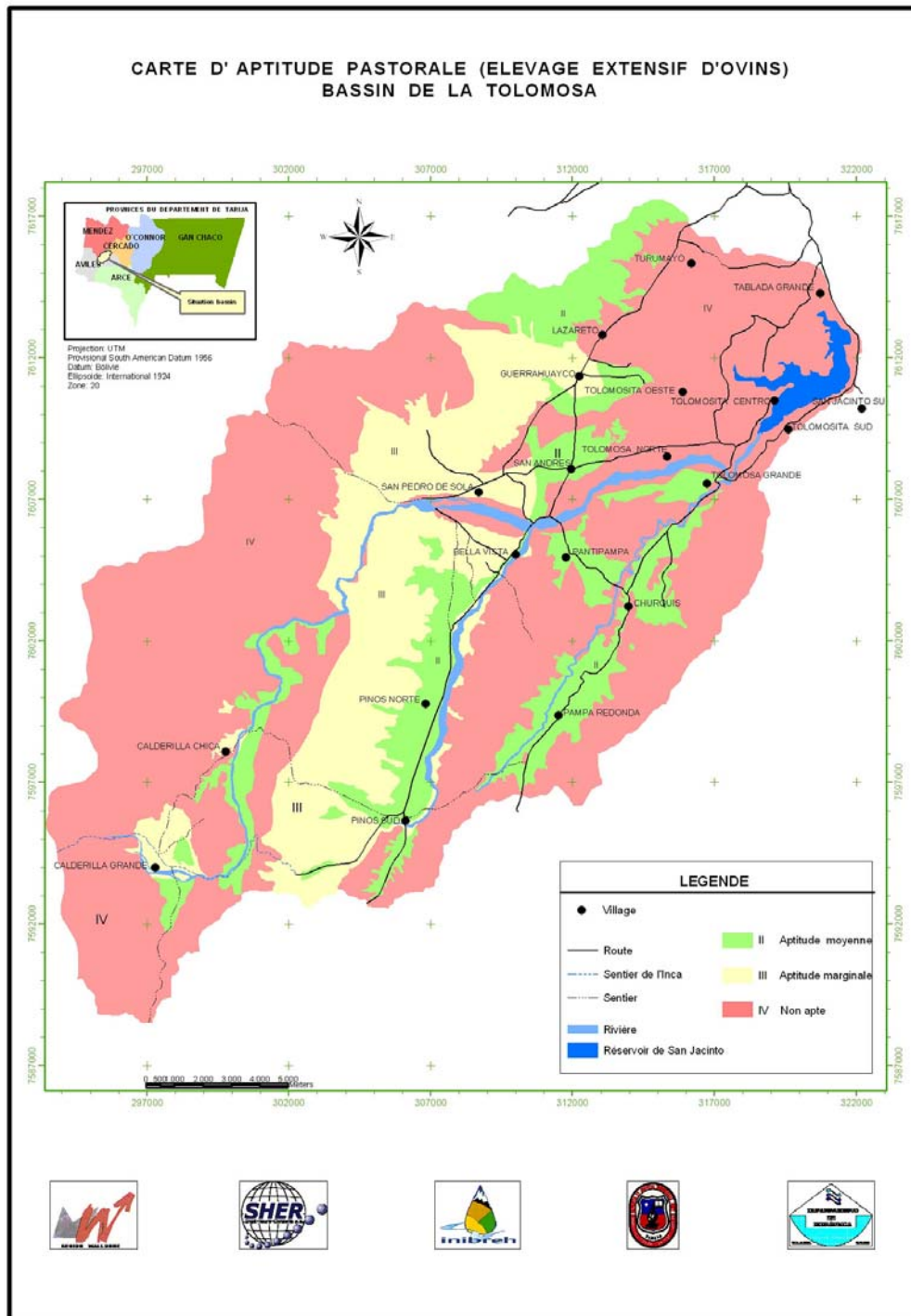
**TABLEAU IV-6: superficies exprimées en hectare et pourcentage du bassin des classes d'aptitude forestière – Bassin de la Tolomosa**

Classe/aptitude		Superficie	
		(ha)	(% du B V)
I	Elevée	1.217	3
II	Moyenne	13.159	31
S/total		14.376	34
III	Marginale	7.760	18

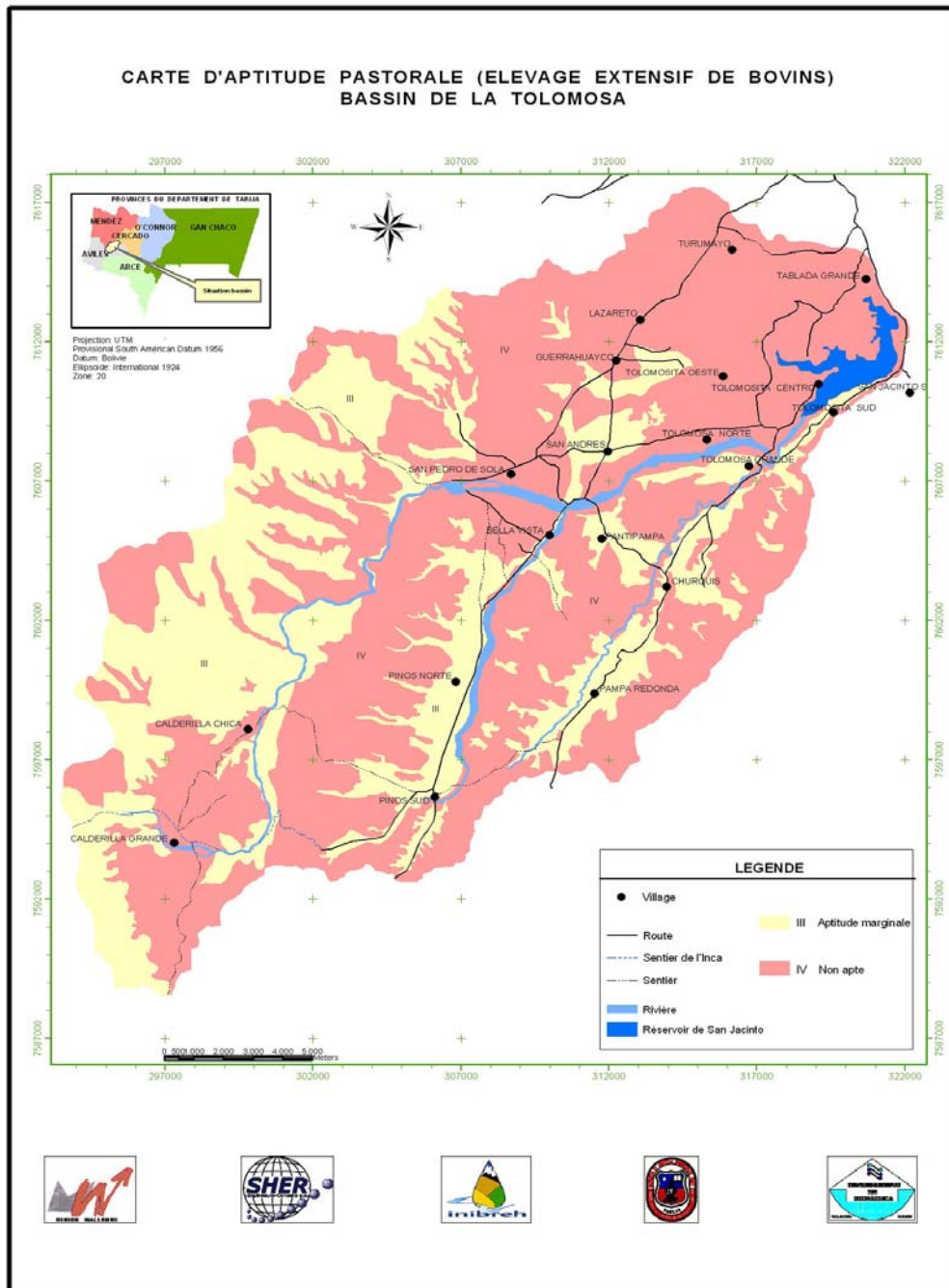
On remarque que les meilleures classes d'aptitude trouvées dans le bassin sont celles liées à l'exploitation forestière. La représentation des unités classées et la localisation spatiale sont reprises sur la carte de la figure IV-4.



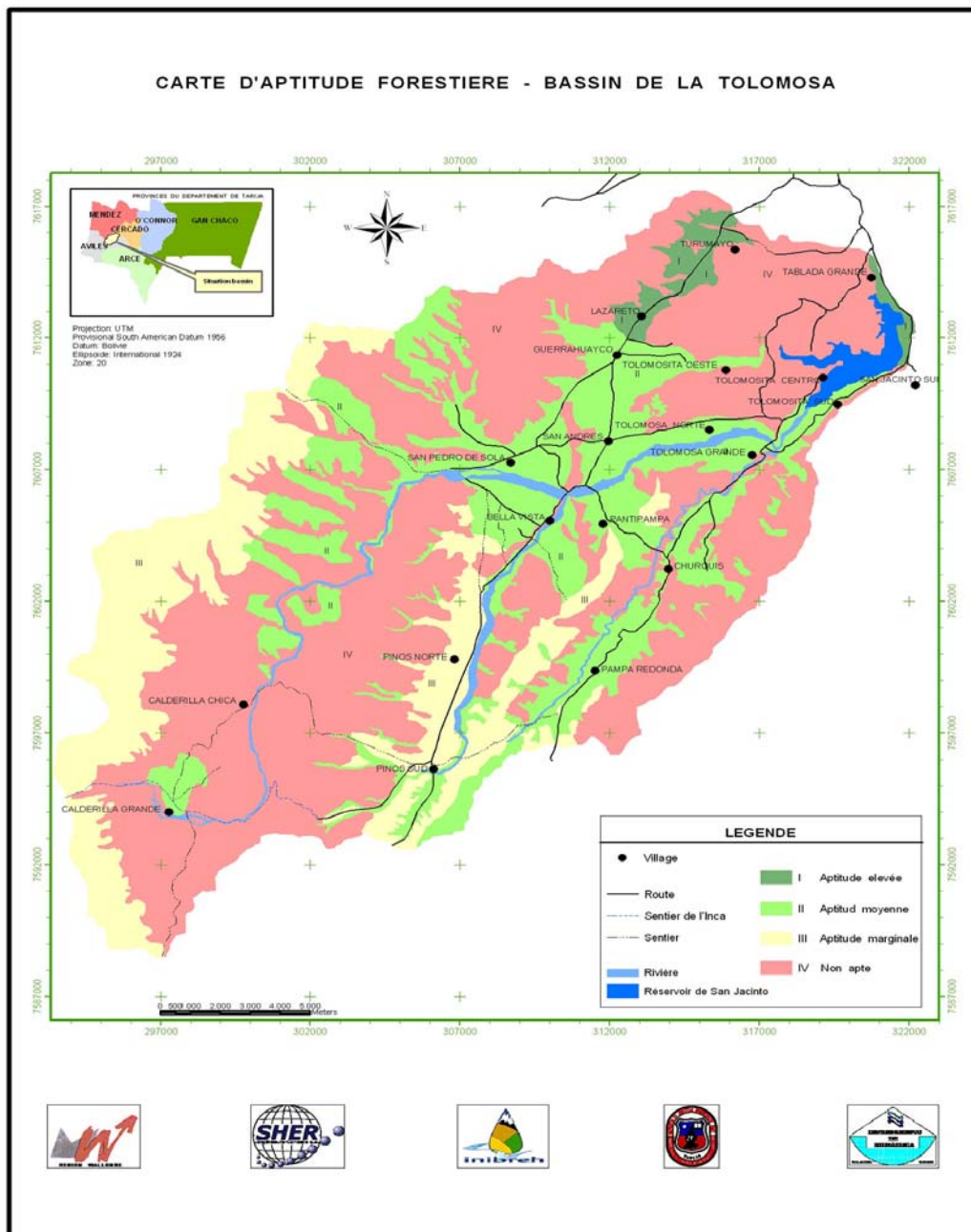
**FIGURE IV-1: carte des classes d'aptitude agricole - Bassin de la Tolomosa**



**FIGURE IV-2: carte des classes d'aptitude pastorale (élevage extensif d'ovins) - Bassin de la Tolomosa**



**FIGURE IV-3: carte des classes d'aptitude pastorale (élevage extensif de bovins) - Bassin de la Tolomosa**



**FIGURE IV-4: carte des classes d'aptitude forestière - Bassin de la Tolomosa**

## IV-2.2 CARTE DES CLASSES DE PENTE

L'élaboration de la carte des classes de pente est directement basée sur le MNT qui a été préalablement converti en format polygone.

Sept classes de pente sont définies pour illustrer le relief du bassin et sont décrites moyennant les seuils respectifs repris ci-dessous. Le seuil de 5% est choisi pour permettre de mieux délimiter les zones de plaines cultivées.

1. P1: pente < 2%: relief plat à presque plat (plan)
2. P2: pente 2-5%: relief doucement ondulé
3. P3: pente 5-10%: relief ondulé
4. P4: pente 10-15%: relief vallonné
5. P5: pente 15-30%: relief accidenté
6. P6: pente 30-60%: relief escarpé
7. P7: pente > 60%: relief très escarpé ou falaise

Le tableau IV-7 indique les classes de pente et le paysage dominant ainsi que sa superficie correspondante dans le bassin versant de la Tolomosa.

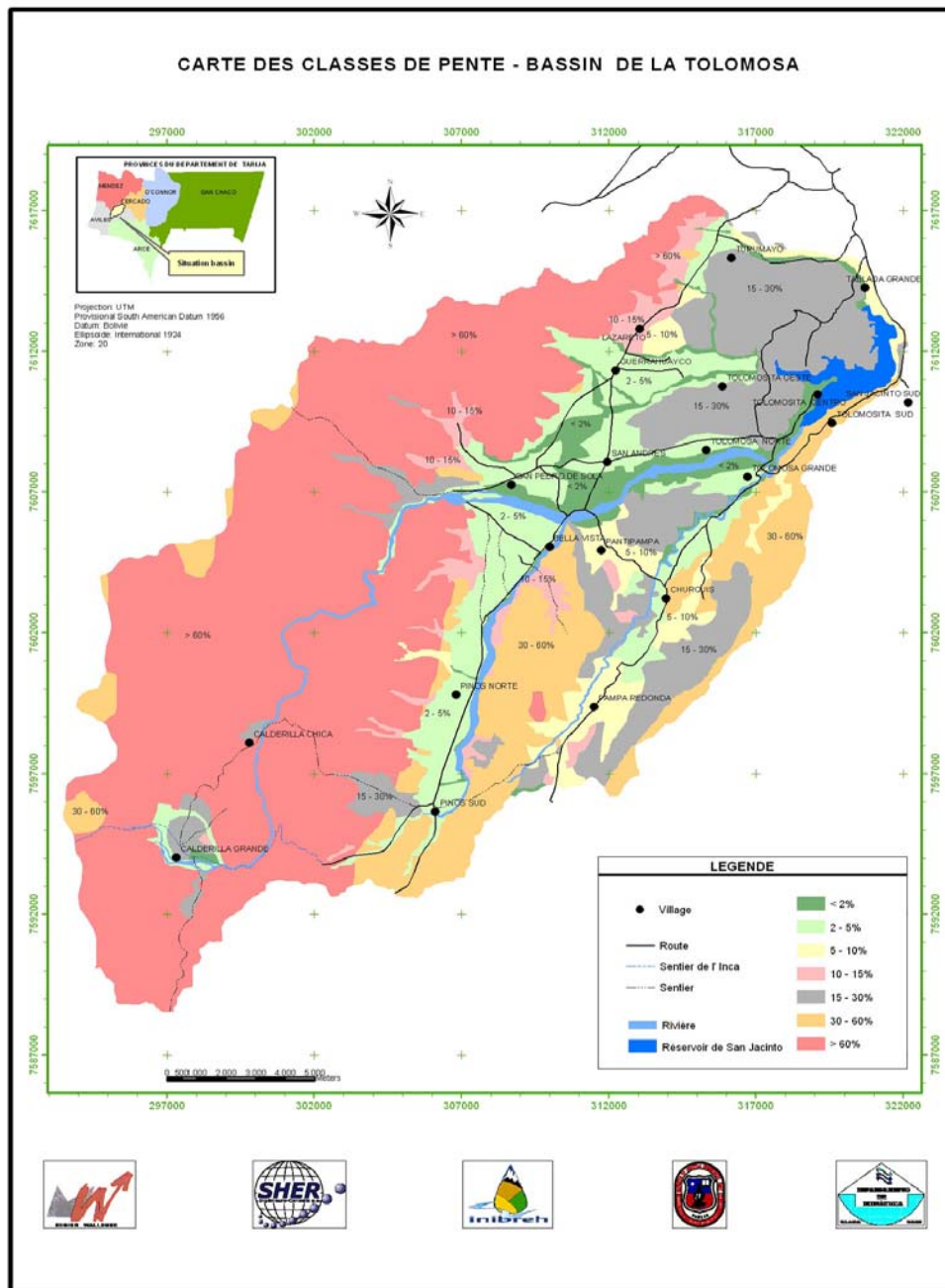
**TABLEAU IV-7: classes de pente, paysages dominants et superficies correspondantes - Bassin de la Tolomosa**

Classe	Seuil (%)	Description	Paysage dominant	Superficie	
				(ha)	(%)
P1	0 – 2	Plan	Vallées	1.914	4
P2	2 – 5	Doucement ondulée	Vallées et les bas glacis peu pentus	5.253	12
P3	5 – 10	Ondulée	Plupart des glacis jusqu'au raccordement au piémont des vallées	1.921	4
P4	10 – 15	Vallonnée	Collines	1.379	4
P5	15 – 30	Accidentée	Versants et plupart des collines	6.387	15
P6	30 – 60	Escarpée	Montagnes	5.513	13
P7	> 60	Très escarpée	Hautes montagnes; falaises, corniches abruptes de roches affleurantes	20.839	48

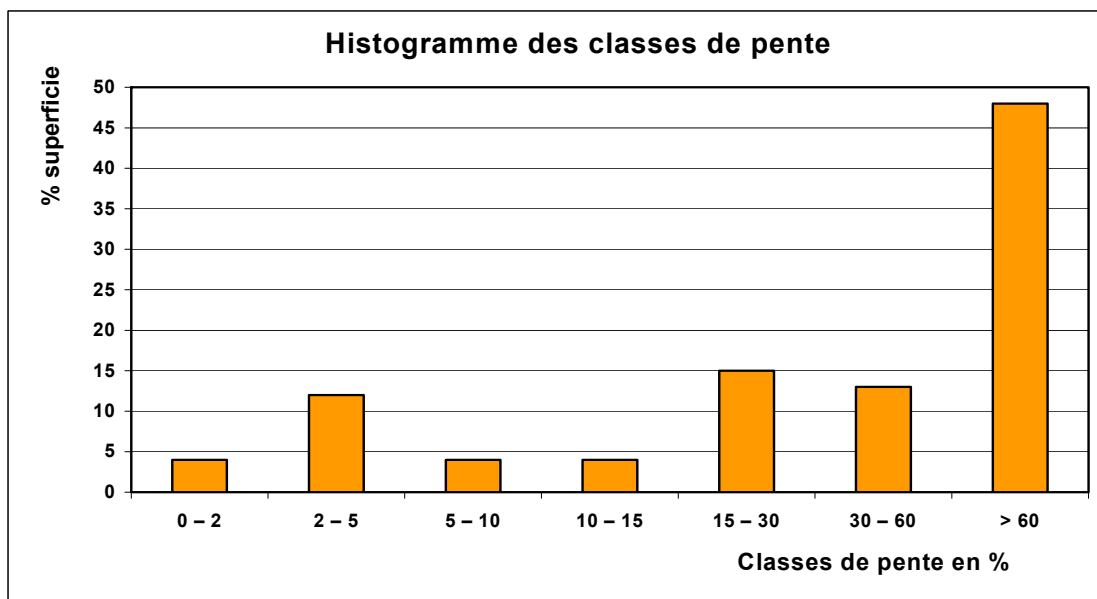
A la lecture du tableau IV-7, on constate que plus de 20.000 hectares, qui correspondent à pratiquement la moitié de la surface du bassin étudié, sont couverts par des montagnes ou chaînes de montagnes (Sama) avec des pentes extrêmement escarpées.

La localisation spatiale des classes de pente est présentée sur la carte de la figure IV-5.

Les résultats du tableau IV-7 sont aussi présentés sous forme d'histogrammes de la figure IV-6. Rappelons que la surface du rectangle indique l'importance mesurée en pour cent de la surface couverte par chaque classe de pente du bassin versant.



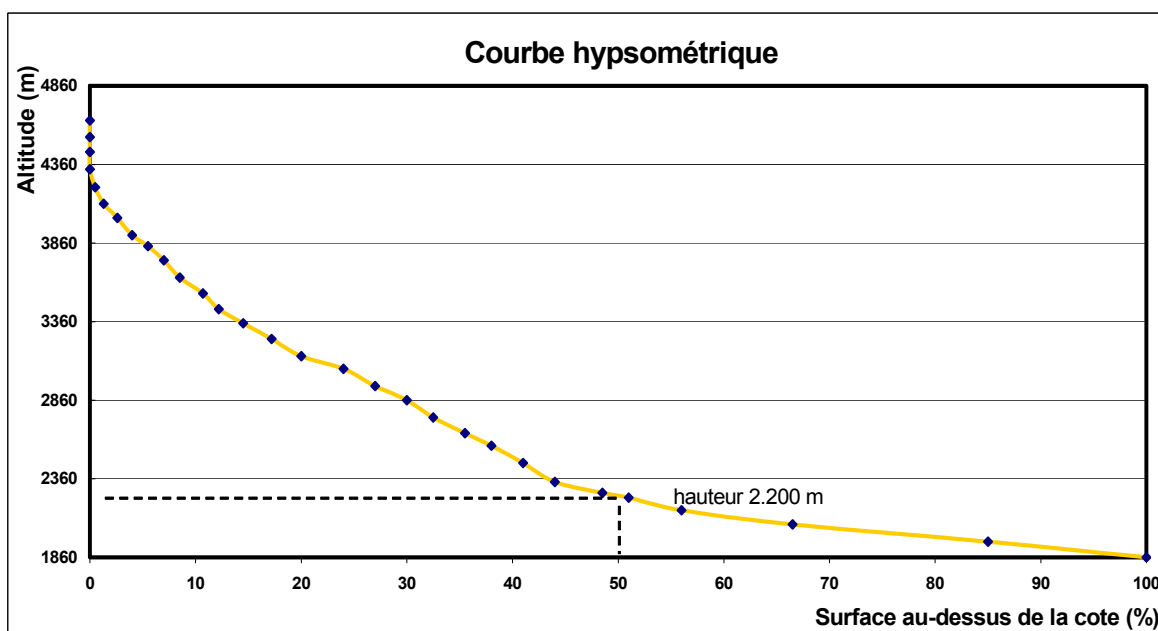
**FIGURE IV-5: carte des classes de pente – Bassin de la Tolomosa**



**FIGURE IV-6: histogramme des classes de pente – Bassin de la Tolomosa**

Il apparaît que plus de la moitié de la superficie du bassin possède une pente supérieure à 30%, et cela avec une majorité supérieure à 60%. Cette grande étendue possède des pentes escarpées à très escarpées qui influencent les processus hydrologiques et de dégradation des sols et du paysage.

L'hypsométrie est une caractéristique importante du bassin versant liée, entre autres, à la distribution de la pluie. La courbe hypsométrique du bassin de la figure IV-7 fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Elle présente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de l'altitude qui varie de 1.860 à 4.660 m.



**FIGURE IV-7: courbe hypsométrique – Bassin de la Tolomosa**

L'analyse de la courbe hypsométrique de la figure IV-7 indique que le bassin versant se situe à une altitude moyenne de 2.200 m.

Cependant, une analyse plus détaillée de certaines classes de pente pourra être nécessaire dans la suite de l'étude du fait du lissage induit par la dimension des mailles du MNT. De plus, compte tenu de

la digitalisation des courbes de niveau chaque 40 m (ou chaque 100 m dans les zones plus pentues), certaines variations locales du relief ne sont pas prises en compte.

### **IV-2.3 PROPRIETES AGRICOLES**

L'approche hédonique exige un travail préalable de collecte de données sur les prix et les caractéristiques des terrains individuels. Cette approche demande une grande quantité d'informations qui ne sont pas toujours disponibles dans le bassin, surtout du point de vue de la qualité environnementale. A cet égard, il est inévitable que des caractéristiques importantes soient omises pour des raisons d'observabilité. On aura beaucoup de peine à obtenir des données sur le degré d'ensoleillement précis du terrain par exemple.

Le cadre juridique est appliqué de manière assez lâche lors de l'acquisition de biens fonciers dans le bassin versant. Officiellement, toutes les transactions (achat ou vente de terrains) sont enregistrées au cadastre. Toutefois, comme ces terres sont généralement exemptes d'impôts, les nouveaux propriétaires n'ont pas l'obligation d'enregistrer la transaction. Une autorité locale, souvent coutumière<sup>1</sup>, est en général présente lors de la passation du marché en tant que témoin. Beaucoup de propriétaires ne sont alors pas dotés des titres de propriété correspondants, ce qui crée de nombreux conflits sociaux et constitue un frein pour les investissements en capital sur la terre. Selon PEA (1998), les formes d'acquisition des propriétés rurales sont principalement la transaction avec 55% du total et l'héritage, avec 41%. Cette situation restreint la base de données directement disponibles pour l'étude des caractéristiques du foncier dans le bassin versant.

Les transactions commerciales ont été analysées durant les années 2003 à 2005 sur un échantillon de quatre-vingt-sept terrains agricoles dans les trois sous-bassins de TolomosaA, de Mena et de Pinos. Une équipe multidisciplinaire a été mise sur pied pour repérer et géoréférencer les propriétés en utilisant un GPS (coordonnées UTM X et Y) et collecter les données d'une vingtaine de variables explicatives initialement envisagées pour expliquer le prix d'un terrain agricole. Ces variables ont porté sur la taille (ha) et la pente (pente moyenne de la propriété mesurée avec un clinomètre); le type de sol, la profondeur effective du sol (profondeur qui ne limite pas la croissance des racines) et le drainage interne (FAO, 1990); le degré d'érosion et l'occupation actuelle des terres examinés visuellement et définis suivant les degrés établis par la carte du degré d'érosion (confer figure I-10) et les unités d'occupation (confer figure I-11); la disponibilité d'énergie électrique, d'eau potable et d'eau d'irrigation (canaux ouverts en terre ou revêtus); l'aptitude agricole, obtenue par le croisement de la carte d'aptitude agricole avec celle de la localisation des terrains évalués; les risques d'incendie de broussailles (obtenus par le croisement de la carte des risques d'incendie avec celle de la localisation des terrains évalués); la proximité d'une école; la qualité de l'eau potable et de l'eau d'irrigation. La description des variables indépendantes observées par propriété est donnée dans le tableau IV-8.

Une petite base de données est ainsi créée pour chaque propriété et est reprise à l'annexe IV-1. Malgré les limitations énoncées ci-dessus, on considère que l'information sur le marché de la terre est suffisante, grâce à la petite taille du secteur agricole situé principalement dans les vallées, pour permettre l'utilisation de la méthode des prix hédoniques lors de la valorisation d'une propriété rurale.

---

<sup>1</sup> *Corregidor*

**TABLEAU IV-8: description des variables indépendantes observées par propriété**

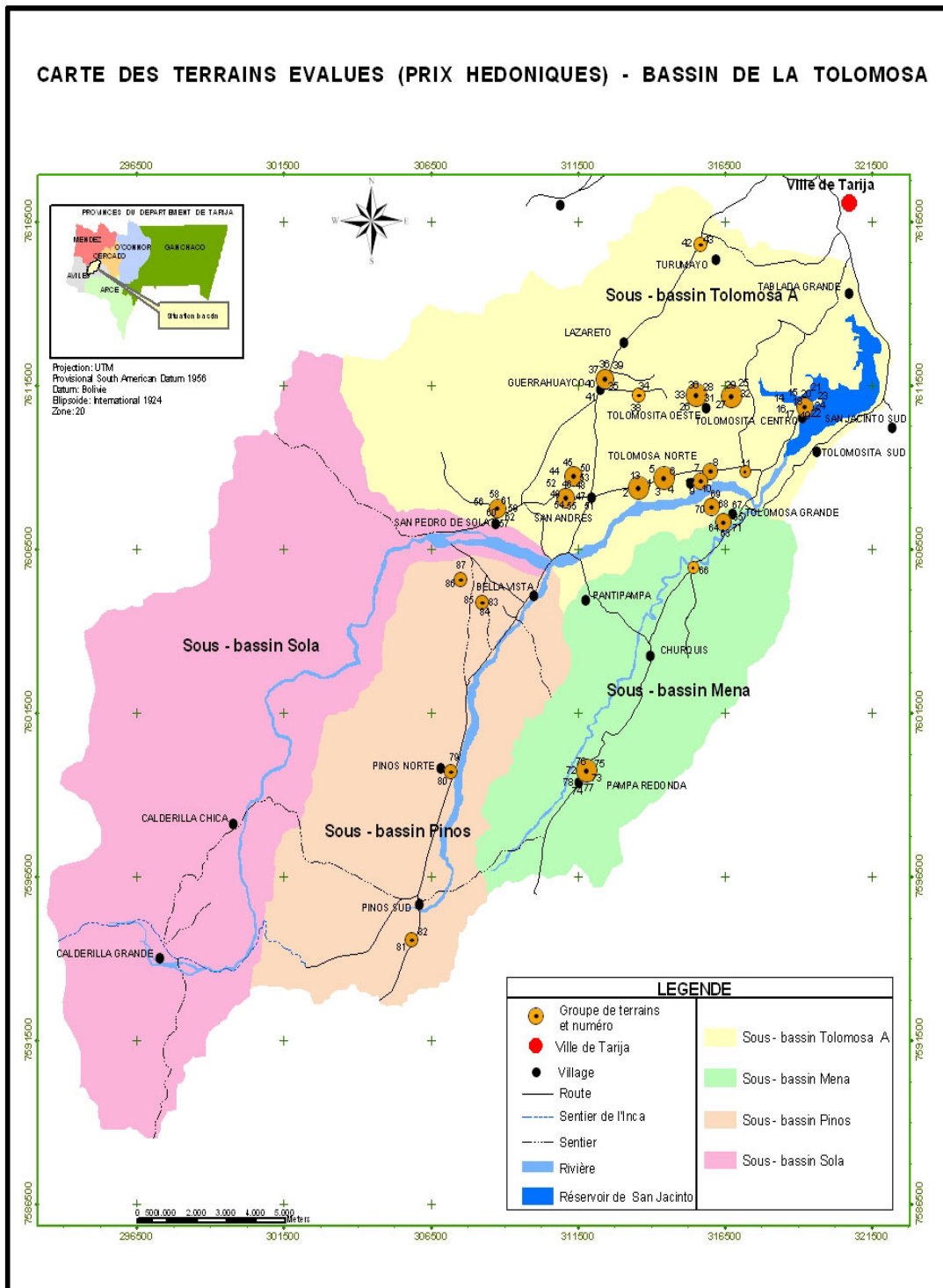
Variable	Description
Superficie	Superficie en hectare et m <sup>2</sup> de la propriété
Périmètre	Périmètre de la propriété mesuré en m
X coordonnée	Coordonnée de la propriété en UTM
Y coordonnée	Coordonnée de la propriété en UTM
Pente	Pente observée mesurée en % (clinomètre)
Aptitude agricole	Selon les classes de la carte d'aptitude agricole
Occupation des terres	Occupation actuelle dominante des terres de la propriété selon les classes de la carte de l'occupation des terres
Forme de la pente	Forme prédominante des pentes > 2%: droite, convexe, concave, en terrasse, irrégulière (FAO, 1990)
Drainage naturel ou artificiel	Estimé selon les classes suivantes (FAO, 1990): E drainage excessif LE drainage légèrement excessif B bon drainage M drainage moyen I drainage imparfait Md drainage médiocre
Profondeur effective du sol	Estimée selon les classes suivantes (FAO, 1990): Très superficielle (< 30 cm) Superficielle (30 cm – 50 cm) Modérément profonde (50 cm – 100 cm) Profonde (100 cm – 150 cm) Très profonde (>150 cm)
Perméabilité	Estimée selon les classes suivante (FAO, 1990): EL excessivement lente VL très lente ML modérément lente LE lente MR modérément rapide RA rapide VR très rapide
Degré d'érosion	Selon les classes de la carte du degré d'érosion
Distance de l'école	Distance en m de la propriété jusqu'à l'école la plus proche
Energie électrique	Accès à l'énergie électrique
Eau potable	Accès à l'eau potable
Eau d'irrigation	Accès à l'eau d'irrigation (canal)
Qualité eau potable	Selon les classes du Ministère du développement soutenable, réglementation de la loi 1333 (1995). De A (meilleure qualité) à D
Qualité eau d'irrigation	Selon les classes du Ministère du développement soutenable, réglementation de la loi 1333 (1995). De A (meilleure qualité) à D
Risque d'incendie	Selon les classes de la carte des risques d'incendie de la préfecture: très bas; bas; élevé; très élevé

La carte de la figure IV-8 situe toutes les propriétés étudiées ayant fait l'objet d'une transaction dans le bassin.

#### IV-2.4 PROJET MULTIPLE SAN JACINTO

La construction du Projet Multiple de San Jacinto (PMSJ) a débuté en 1981 et a duré une dizaine d'années. Les ouvrages comprennent un barrage déversoir de 47 m de hauteur avec un volume d'eau de 52,6 millions de mètres cubes et un volume utile de 40 millions de mètres cubes. Depuis l'année 2000, des boudins gonflables ont été installés sur les deux déversoirs du barrage, permettant ainsi de gagner 1,50 mètre de hauteur d'eau dans le réservoir. La cote maximale de hauteur d'eau est alors passée de 1.882,5 mètres à 1.884 mètres pour atteindre un volume maximum d'eau dans le réservoir de 56 Hm<sup>3</sup>. La comparaison du volume et de la surface du réservoir avant et après l'installation des boudins gonflables est donnée dans le tableau IV-9 (source: Caryglobal srl).

**CARTE DES TERRAINS EVALUES (PRIX HEDONIQUES) - BASSIN DE LA TOLOMOSA**



**FIGURE IV-8: Localisation des propriétés agricoles étudiées dans les trois sous-bassins – Bassin de la Tolomosa**

**TABLEAU IV-9: comparaison du volume et de la surface du réservoir avant et après l'installation des boudins gonflables (source: Caryglobal srl) – Bassin de la Tolomosa**

Caractéristique	Unité	Avant installation (cote 1.882,5 m)	Après installation (cote 1.884 m)	Gain (%)
Volume total	m <sup>3</sup>	52.580.339	55.932.509	6
Volume utile	m <sup>3</sup>	39.679.745	46.209.204	16,5
Volume mort	m <sup>3</sup>	12.900.593	9.736.305	32,7
Surface (1)	ha	532	649	13,1

(1) moyenne annuelle

Depuis 1997, le PMSJ est une entité déconcentrée sous la dépendance de la préfecture de Tarija. Il joue un grand rôle dans le développement du bassin et est responsable des activités suivantes:

- Production hydroélectrique pour la ville de Tarija à partir de l'eau du réservoir de San Jacinto.
- Développement et gestion d'un périmètre d'irrigation situé hors du bassin versant (3.000 ha).
- Fourniture d'eau potable pour la ville de Tarija par pompage du réservoir.

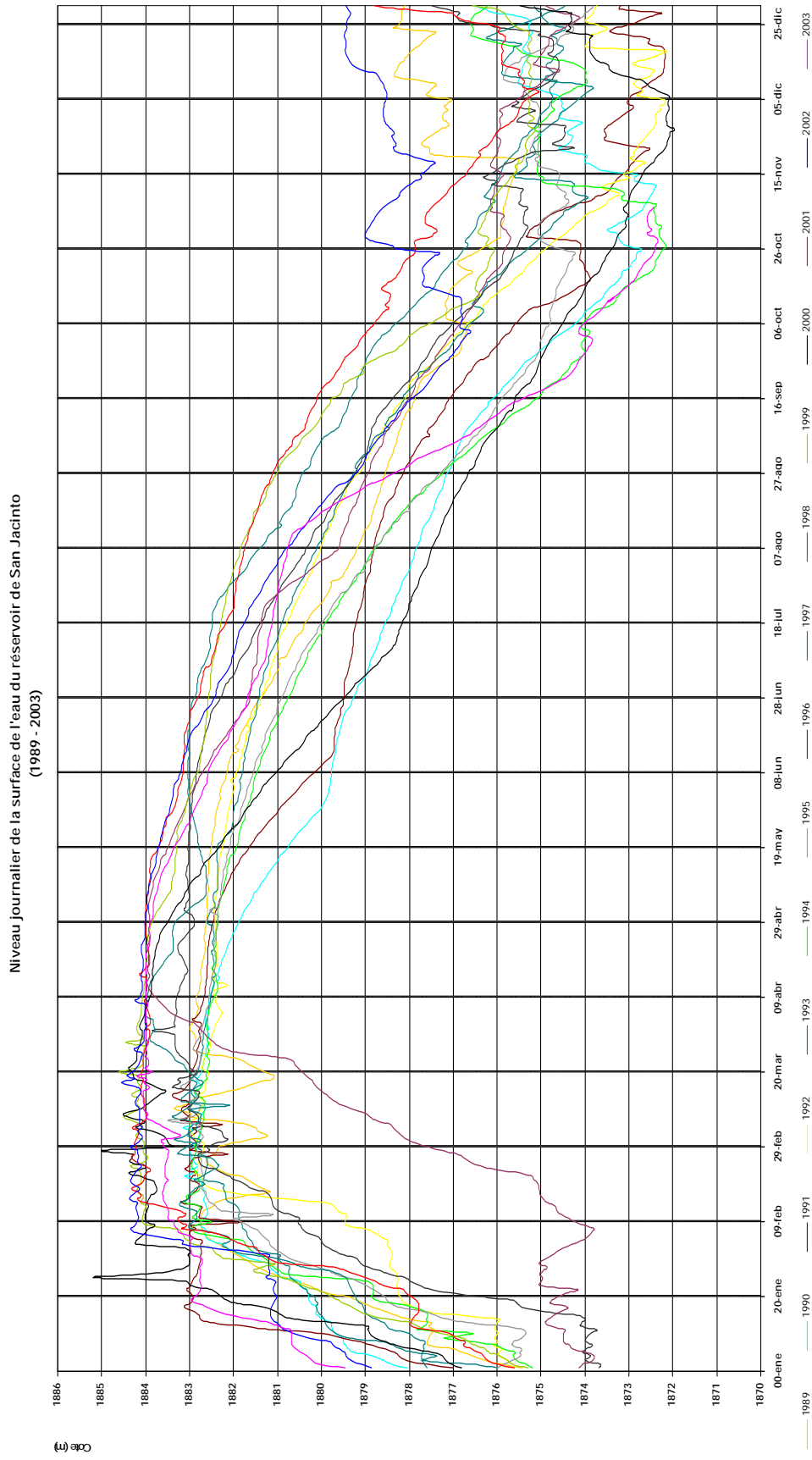
La répartition annuelle moyenne de l'eau utile du réservoir entre les trois principaux groupes d'usagers est la suivante:

- 2 millions de m<sup>3</sup> pour l'irrigation, soit 9% du total annuel consommé.
- 20 millions de m<sup>3</sup> pour la production d'électricité, soit 91% du total annuel consommé.
- 450.000 m<sup>3</sup> pour l'eau potable, soit environ 1% du total annuel consommé.

La quantité d'eau pompée dans le réservoir pour les besoins en eau potable est considérée comme négligeable, d'autant plus que de nouvelles sources d'eau sont déjà identifiées par la coopérative de distribution d'eau potable de la ville de Tarija (COSAALT). A l'heure actuelle, un grand effort est consenti par le PMSJ pour le développement de la production piscicole (carpes) dans le réservoir et la promotion du tourisme autour du lac artificiel.

L'information sur le volume de la production hydroénergétique provient en grande partie du Projet Multiple San Jacinto (PMSJ) sur la période de 1997 à 2004. La génération hydroélectrique comprend une capacité installée de 7.400 kW divisée en deux groupes, produisant chacun 3.700 kW, comprenant chacun un générateur et deux turbines type Francis à axe horizontal de 1.837 kWh de puissance. L'électricité produite est vendue à la Coopérative des services électriques de Tarija SETAR, responsable de sa distribution aux consommateurs de la ville de Tarija et de la province Cercano.

Le graphique de la figure IV-9 donne en mètre la cote journalière du niveau d'eau dans le réservoir sur la période de 1989 à 2003. La cote de référence (1.871,7 m) est le seuil sous lequel la charge de l'eau n'est plus suffisante pour produire la puissance nécessaire pour la génération d'électricité.



**FIGURE IV-9: fluctuation journalière du niveau d'eau dans le réservoir de San Jacinto sur la période de 1989 à 2003 (source: PMSJ; communication de mars 2006) – Bassin de la Tolomosa**

L'analyse du graphique IV-9 ci-dessus montre que la hauteur d'eau journalière fluctue en accord avec le rythme des saisons, étant à son point le plus bas en fin de saison sèche. On constate aussi que, sur toute la période de 1989 à 2003, le niveau de l'eau n'a jamais atteint la cote fatidique de 1.871,7 m, sous laquelle la hauteur d'eau est trop basse pour la production d'énergie électrique (cavitation).

Le tableau IV-10 donne la quantité annuelle d'eau turbinée en fonction de la cote annuelle moyenne durant les années 2000 à 2004 (source: PMSJ).

**TABLEAU IV-10: cote annuelle moyenne du niveau d'eau dans le réservoir et volume annuel d'eau turbiné de 2000 à 2004 (adapté de PMSJ)**

Année	Cote annuelle moyenne (m)	Volume d'eau			
		Utile		Turbiné	
		(Hm <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(Hm <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
2000	1.878,83	306,91	306.910.000	177,88	177.883.000
2001	1.880,94	406,62	406.622.000	170,32	170.325.406
2002	1.881,06	416,58	416.581.000	166,67	166.679.790
2003	1.879,35	343,51	343.510.000	143,85	143.853.052
2004*	1.848,71	185,22	185.219.000	156,05	156.054.952

(\*) Sans février, mars, avril, juin et septembre

Soulignons que les données des mois de février, mars, avril, juin et septembre de l'année 2004 n'ont pas pu être obtenues, car la cote respective de la hauteur d'eau dans le réservoir n'a pas été relevée par le Projet Multiple San Jacinto (PMSJ). En ne considérant pas l'année 2004 incomplète, le volume annuel moyen utile dans le réservoir est de 368 Hm<sup>3</sup> et turbiné, de 165 Hm<sup>3</sup>. On constate aussi que le volume d'eau utile n'est jamais entièrement consommé pour la production hydroélectrique sur la période considérée.

## IV-3 SITUATION ACTUELLE

La situation actuelle du bassin versant de la Tolomosa est décrite en utilisant l'information secondaire disponible (INE, 2001; Jetté, 1998; PEA(b), 1998; Gutiérrez, 1989) et les résultats d'enquêtes ponctuelles sur le terrain.

### IV-3.1 DEMOGRAPHIE ET OCCUPATION

La population du bassin représente environ 4% du total de la province Cercado dans laquelle se trouve la zone étudiée. La répartition de la population dans le bassin versant présente un aspect dispersé avec quelques villages. Les localités principales rencontrées avec leur nombre d'habitants respectifs sont reprises dans le tableau IV-11 et sur la carte de la figure I-3.

**TABLEAU IV-11: localités principales et population en 2001 (source: INE, 2001) – Bassin de la Tolomosa**

Localité	Habitation		Habitant			
	(nombre)	(%)	(homme)	(femme)	(total)	(%)
Churquis	182	7,6	186	262	448	5,8
Panti Pampa	91	3,8	109	112	221	2,8
Pampa Redonda	193	8	201	217	418	5,4
Tolomosa Grande	629	26	1.023	1.074	2.097	27,2
Bella Vista	212	8,8	320	348	668	8,6
Calderilla	62	2,6	107	121	228	2,9
Pinos Norte	114	4,7	152	149	301	3,9
Pinos Sud	139	5,8	194	180	374	4,6
Guerrahuayco	263	10,9	479	491	970	12,6
San Andres	329	13,7	597	607	1204	15,6
San Pedro de Sola	59	2,5	134	117	251	3,3
Turumayo	134	5,6	250	306	556	7,3
<b>TOTAL</b>	<b>2.407</b>	<b>100</b>	<b>3.752</b>	<b>3.984</b>	<b>7.736</b>	<b>100</b>

Le tableau IV-11 ci-dessus indique que le village le plus important est Tolomosa Grande situé dans la partie nord-est du bassin, avec 27% du total de la population.

Les résultats du recensement (INE, 2001) pour la province Cercado et les données communiquées par le Bureau préfectoral d'aménagement du territoire ont permis de définir les branches d'activités économiques du bassin versant qui sont reprises dans le tableau IV-12.

**TABLEAU IV-12: pourcentage de la population par secteur d'activités (adapté de INE, 2001; communications du Bureau de l'aménagement du territoire de la préfecture, 2007) – Bassin de la Tolomosa**

Secteur	Population du bassin versant (%)
Agriculture, élevage et pêche	16
Construction	20
Petit commerce	30
Transport	15
Services sociaux, santé et éducation	3
Autres	16
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

### IV-3.2 SERVICES

Les services principaux développés à l'heure actuelle et disponibles dans le bassin versant sont l'électrification (accessible à 87% de la population), l'approvisionnement en eau potable (environ 75% de la population) et l'aide médicale. Il existe seize écoles officielles dans le bassin versant, dont trois offrent le niveau éducatif secondaire (INE, 2001).

### IV-3.3 PRODUCTION HYDROELECTRIQUE

La production mensuelle d'énergie électrique mesurée en kWh et le volume d'eau utile correspondant pour les années 2000 à 2004 sont repris dans le tableau IV-13 (cinquante-quatre observations du niveau de l'eau dans le réservoir). Le graphique de la figure IV-10 compare, sur la période de 2000 à 2004, la cote mensuelle moyenne du niveau d'eau dans le réservoir (mètre) avec la production électrique mensuelle moyenne (kWh). L'analyse de la figure IV-10 et du tableau IV-13 permet de constater que le niveau d'eau dans le réservoir est proche de la cote limnimétrique de 1.871,7 m durant la saison sèche.

**TABLEAU IV-13: valeurs mensuelles moyennes de la production électrique (kWh) et du volume d'eau utile sur la période de 2000 à 2004 (source: PMSJ)**

Année	Mois	Production électrique (kWh)	Volume d'eau utile (Hm <sup>3</sup> )
2000	Janvier	2.529	32
	Février	3.514	49
	Mars	3.711	49
	Avril	3.251	48
	Mai	2.508	42
	Juin	1.977	31
	Juillet	1.235	20
	Août	793	15
	Septembre	606	10
	Octobre	419	6
	Novembre	434	2
	Décembre	470	2
2001	Janvier	2.478	19
	Février	3.549	46
	Mars	4.050	50
	Avril	2.062	49
	Mai	1.618	48
	Juin	1.094	44
	Juillet	1.033	40
	Août	842	36
	Septembre	1.009	29
	Octobre	1.103	20
	Novembre	945	14
	Décembre	753	12
2002	Janvier	1.985	37
	Février	2.774	49
	Mars	3.513	51
2003	Avril	2.016	50
	Mai	1.518	48
	Juin	1.353	44
	Juillet	1.207	38
	Août	1.389	29
	Septembre	915	19
	Octobre	994	16
	Novembre	1.541	20
	Décembre	891	16
	Janvier	1.510	37
	Février	2.621	46
	Mars	2.955	49
Avril	1.932	49	
Mai	1.826	46	
Juin	1.395	40	
Juillet	867	35	
Août	1.739	28	
Septembre	1.203	10	
Octobre	527	4	
Novembre	277	0	
Décembre	492	0	
2004	Janvier	1.425	34
	Mai	1.401	49
	Juillet	1.146	44
	Août	1.517	37
	Octobre	1.007	21
	Novembre	898	0

Le Projet Multiple San Jacinto, dans sa relation commerciale avec la coopérative électrique SETAR s.a. est obligé de livrer la quantité annuelle minimum d'énergie électrique de 20.106 kWh (ou 1.750 kW par turbine). Pour produire cette énergie contractuelle à partir du volume d'eau utile, 16 m<sup>3</sup>/s d'eau sont nécessaires, c'est-à-dire 4 m<sup>3</sup> par turbine, durant un total de 2.880 heures environ. Le volume d'eau total turbiné théorique est alors de 165.880.000 m<sup>3</sup> par an<sup>1</sup>.

Le tableau IV-14 indique la demande de puissance, la quantité d'énergie hydroélectrique produite ainsi que les revenus bruts obtenus de la vente d'énergie à SETAR sur la période de 1997 à 2005.

<sup>1</sup> 16 m<sup>3</sup>/s donnent 57.600 m<sup>3</sup>/h; 57.600 x 2.880 h donnent 165.880.000 m<sup>3</sup> turbinés par les quatre turbines en même temps

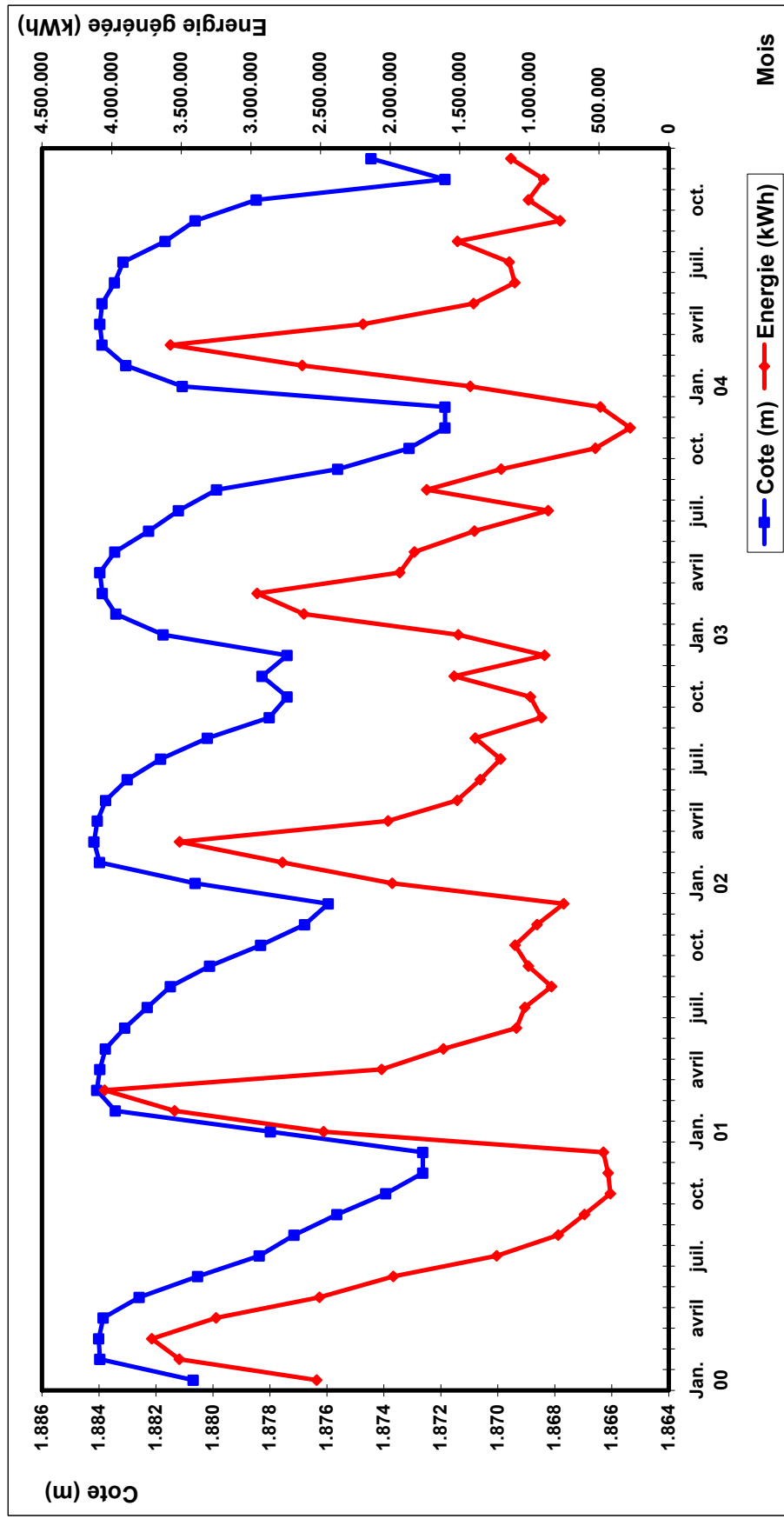


FIGURE IV-10: comparaison entre la cote mensuelle moyenne (mètre) du niveau d'eau dans le réservoir de San Jacinto et la quantité d'énergie produite (kWh) sur la période de 2000 à 2004 (source: PMSJ) – Bassin de la Tolomosa

**TABLEAU IV-14: revenu brut total annuel de la vente d'énergie électrique par le PMSJ (source: PMSJ)**

Année	Demande de puissance max. (kW)	Prix (1) (USD/kW)	Revenu pour demande de puissance max. (USD)	Energie générée (3) (kWh)	Prix (2) (USD/kWh)	Revenu pour énergie générée (USD)	Revenu total (4) (USD)
1997	62.787	8,29	521.057	11.934.999	0,0298	356.753	877.810
1998	80.296	8,29	666.364	16.648.636	0,0298	497.649	1.164.013
1999	86.781	8,29	720.180	23.132.243	0,0298	691.453	1.411.632
2000	79.000	4,0	316.000	21.447.252	0,015	321.709	637.709
2001	89.500	4,0	358.000	20.535.858	0,015	308.038	666.038
2002	89.550	4,0	358.200	20.096.430	0,015	301.446	659.645
2003	82.200	4,0	328.800	17.344.231	0,015	260.163	588.963
2004	47.200	4,0	328.800	18.815.403	0,028	526.831	855.631
2005	91.450	4,0	328.800	18.815.403	0,028	526.831	855.631
<b>TOTAL</b>	<b>708.765</b>		<b>3.926.200</b>	<b>168.770.458</b>		<b>3.786.152</b>	<b>7.712.353</b>
<b>Moyenne</b>	<b>78.752</b>		<b>436.244</b>	<b>18.752.273</b>		<b>420.684</b>	<b>856.928</b>

(1) Prix de la production de puissance, mesurée en kW, nécessaire pour faire tourner les quatre turbines en même temps et produire les 7.000 kW

(2) Prix fixés entre la préfecture, le PMSJ et SETAR

(3) Sur la ligne électrique partant de San Jacinto vers la ville de Tarija

(4) Revenu pour demande de puissance + revenu énergie électrique générée

Le tableau IV-14 ci-dessus indique que la moyenne annuelle d'énergie produite est de 18.752.273 kWh, légèrement inférieure au contrat de fourniture annuelle obligatoire. On observe aussi que, sur cette période de neuf années, la demande moyenne de puissance est de 78.752 kW qui correspond à une demande mensuelle de puissance de 6.000 kW compatible avec les 7.000 kW que peuvent fournir les quatre turbines.

Le prix du kWh a fluctué dans le temps, passant de 0,0298 USD jusqu'à la gestion 1999 incluse à 0,015 USD jusqu'en 2003 et à 0,028 USD à partir de 2004. Le revenu total brut correspondant perçu par le PMSJ est de 7.712.353 USD, avec une recette annuelle moyenne de 856.928 USD. Rappelons que ces chiffres sont le fruit d'une décision de politique départementale.

## **IV-3.4 PRODUCTION AGRICOLE**

### **IV-3.4.1 SYSTEMES DE PRODUCTION**

La notion de système de production agricole concerne la façon de combiner les facteurs de production et les produits au niveau des exploitations. Il s'agit donc d'un mode de fonctionnement des exploitations (Mergeai, 2007).

Le développement des systèmes de production agricole dépend principalement des conditions écologiques de la terre, de la disponibilité de l'eau et d'autres facteurs liés à l'altitude tels que la pluviométrie, le gel et la température.

#### **IV-3.4.1.1 Types d'exploitation**

Le décret de la réforme agricole du 2 août 1953 a permis la distribution des terres des anciennes propriétés. Ce processus a influencé la structure des propriétés agricoles actuelles qui sont principalement morcelées en petites propriétés.

Le type d'exploitation le plus répandu sur les versants des montagnes et dans les vallées de la partie sud-ouest du bassin (région de Pinos) est l'exploitation familiale minifundiaire d'une superficie généralement inférieure à l'hectare. Les activités entreprises visent surtout à satisfaire l'auto-consommation familiale.

Dans les zones de piémonts et dans la plaine alluviale du bassin, là où les terres ont une aptitude agricole moyenne, on trouve des exploitations familiales marchandes où les systèmes de production pratiqués assurent le plein emploi de la force de travail des familles d'exploitants et permettent de produire des biens agricoles destinés à la vente. Lors des pointes de travail, un recours épisodique à la main-d'œuvre saisonnière ou à certaines formes de mécanisation n'est pas exclu. L'accumulation de capital prend en général la forme d'un accroissement de la superficie des terrains ou de la taille du cheptel. Certaines exploitations atteignent les dix à vingt hectares dans la région de San Andres.

#### **IV-3.4.1.2 Systèmes et moyens de production**

La distribution actuelle des zones de production dans le bassin versant s'adapte fondamentalement à l'altitude qui différencie des terres hautes (au-dessus des 3.500 mètres), des terres de piémonts et, enfin, des terres de vallées (3.500 à 1.800 mètres). Aussi, le bassin versant présente deux grands types de systèmes de production agricole: une agriculture de subsistance sur les versants des montagnes près des sources d'eau ou des torrents et dans les vallées hautes de la partie sud-ouest du bassin (région de Pinos et Sola) et une agriculture plus intensive dans les zones de piémonts et de la plaine alluviale du bassin.

L'agriculture de subsistance est orientée principalement vers l'auto-consommation (pomme de terre; orge). Le maigre surplus éventuel est commercialisé directement dans la vallée. Le système de production agricole prédominant est un système mixte extensif de type familial intégré dans un réseau de services et d'aides mutuel. Les exploitations sont généralement inférieures à un hectare et couvrent des terres marginales à faible productivité avec une récolte par an. Cette faible productivité pousse à la migration saisonnière vers Bermejo (récolte de la canne à sucre) et l'Argentine (main-d'œuvre agricole). On estime que la migration peut représenter jusqu'à 80% du revenu d'une famille (PEA, 2004). La complémentarité entre l'agriculture et l'élevage d'ovins qui est la base du développement de l'artisanat, permet le maintien de la population en évitant la migration définitive, malgré les dures conditions de vie. Les moyens de production sont traditionnellement axés sur l'élevage extensif. Le capital fixe d'exploitation tel qu'outils et bâtiments est pratiquement inexistant; les moyens de traction se limitent en général à la traction humaine. Le capital d'exploitation circulant

se limite principalement aux semences; il n'y a pas d'achat d'engrais. Les techniques culturales sont rudimentaires et les pratiques culturales sont exigeantes en main-d'œuvre. Ce mode cultural, souvent mal géré, entraîne en général une dégradation rapide des terres.

Dans les zones de piémonts et des plaines alluviales du bassin, le système de production agricole est plus intensif, avec des propriétés pouvant aller de 1 à 3 hectares et, dans certains cas, jusqu'à 20 hectares (plaines alluviales). L'aire de distribution géographique couvre en général les terres aptes à l'agriculture (classe II). Les moyens de production sont plus importants. Le système de production se caractérise par des investissements en intrants (main-d'œuvre, semences et engrais), des moyens de traction mécanique (tracteurs) et par un accès à l'irrigation de type rudimentaire. L'emploi de la culture attelée reste fonction des réserves fourragères en quantité suffisante pendant la saison sèche pour aborder le travail dès le début de la saison des pluies.

#### IV-3.4.1.3 Caractérisation des systèmes de culture

Dans le bassin, la diversité des cultures (et de la couverture végétale) est en grande partie conditionnée par les caractéristiques du milieu biophysique, la présence de nombreux microclimats, la position dans la topo-séquence et la nature des sols. Le tableau IV-15 montre la répartition des terres cultivées<sup>1</sup> actuellement dans le bassin versant par classe de terre (classe II avec une aptitude moyenne et classe III avec une aptitude marginale) et par sous-bassin.

**TABLEAU IV-15: surfaces agricoles cultivées par classe de terre (AGRC) et par sous-bassin – Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Surface cultivée			
	Totale (ha)	Par sous-bassin (%)	Classe II (ha)	Classe III (ha)
TolomosaA	3.704	28	1.483	2.221
Mena	999	15	829	170
Sola	323	2	213	110
Pinos	1.168	14	170	998
<b>TOTAL</b>	<b>6.192</b>	<b>100</b>	<b>2.694</b>	<b>3.499</b>

On constate que la surface agricole actuellement cultivée (AGRC) dans le bassin versant est de 6.192 hectares, dont 56% de la superficie couvrent des terres considérées comme marginales (classe III).

Le chronogramme de la figure IV-11 donne le calendrier cultural et la rotation annuelle des cultures sur les versants des montagnes, dans les zones de piémonts et des plaines alluviales du bassin versant.

Le calendrier cultural montre la présence de légumineuses dans la rotation culturale pour maintenir une quantité suffisante d'azote dans le sol. Dans les zones hautes et sur les versants des montagnes, les espèces cultivées sont principalement la pomme de terre, la papalisa (*ullucus tuberosus* Loz.) et la papa oca (*oxalis tuberosa*). La production est orientée vers l'auto-consommation.

Dans les piémonts et la plaine alluviale du bassin, les espèces cultivées sont principalement le maïs, l'oignon et la pomme de terre. Dans la région de San Andres (partie centrale du bassin), la culture commerciale de la pomme de terre est prédominante avec un accès aisé au marché de la ville de Tarija (120.000 habitants). Cette culture est une importante source de revenus monétaires.

#### IV-3.4.2 PRODUCTION

La production agricole commercialisée dans le cas de la situation actuelle, dont le bilan en eau est modélisé via TOLOHRU couvre une superficie de 6.192 hectares, dont 2.694 hectares sur les terres de classe d'aptitude II (confer tableau IV-15), et le reste sur les terres marginales, dont la production est considérée comme principalement auto-consommée ou utilisée comme aliments pour le bétail.

<sup>1</sup> Correspondent au code AGRC dans la nomenclature SWAT

Cultures principales	Saison humide						Saison sèche			Saison hivernale sèche			Observations
	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	
<b>Plaines et piémonts</b>													
Pomme de terre													Pluviale
Maïs													Pluviale
Oignon													Pluviale
Carotte													Irrigation complétement.
Pomme de terre													Irriguée
Oignon													Irriguée
Fève													Irriguée
Pois													Irriguée
Avoine													Irriguée (fourrage)
<b>Versants et terres hautes</b>													
Pomme de terre													Pluviale
<i>Papalisa (ullucus tuberosus Loz.)</i>													Pluviale
<i>Papa oca (oxalis tuberosa)</i>													Pluviale

FIGURE IV-11: calendrier cultural et rotation annuelle des cultures – Bassin de la Tolomosa

Le rendement et le revenu brut par hectare pour les principales cultures dans les vallées du bassin versant sont donnés dans le tableau IV-16 (PEA, 2005; PEA, 2004; Beck et al., 2001; Faculté des Sciences économiques UAJMS, J. Orellano R., base de données non publiée). Les données disponibles ont été complétées par des enquêtes ponctuelles de terrain.

**TABLEAU IV-16: rendement et revenu moyen par hectare des principales cultures (mars 2006: 1 USD = 8 BOB) (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001; Faculté des Sciences économiques UAJMS, J. Orellano R., base de données non publiée) - Bassin de la Tolomosa**

Culture	Rendement moyen (kg/ha)	Prix unitaire moyen (BOB/kg)	Revenu brut (BOB/ha)
Pomme de terre	9.000	1,1	9.900
Maïs	1.900	3	5.700
Pois	5.600	1,5	8.400
Reste	5.600	5	28.000

Le revenu moyen brut d'une famille dans les vallées du bassin versant est donné dans le tableau IV-17 (PEA, 2005; PEA, 2004; Beck et al., 2001; Faculté des Sciences économiques UAJMS, J. Orellano R., base de données non publiée). Les données disponibles ont été complétées par des enquêtes ponctuelles de terrain.

**TABLEAU IV-17: revenu agricole familial moyen brut (mars 2006: 1 USD = 8 BOB) (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001; Faculté des Sciences économiques UAJMS, J. Orellano R., base de données non publiée) – Bassin de la Tolomosa**

Culture	Superficie moyenne (m <sup>2</sup> )	Production moyenne (kg)	Revenu brut (BOB)
Pomme de terre	6.000	5.400	5.940
Maïs	4.000	760	2.280
Pois	2.000	1.120	1.680
Reste	500	280	1.400
<b>TOTAL</b>	<b>12.500</b>		<b>11.300</b>

Environ 30% du volume de la production des légumes et pois sont auto-consommés et les 70% restants vendus dans les marchés, principalement ceux de la ville de Tarija. La production de maïs est pratiquement consommée par le bétail. Comme la pomme de terre irriguée et non irriguée est la culture la plus répandue dans le bassin avec le meilleur revenu par hectare, on considère que les 2.694 hectares de terres agricoles de classe II du bassin versant sont cultivés avec la pomme de terre. La valeur annuelle brute de la production agricole du bassin versant est donnée dans le tableau IV-18.

**TABLEAU IV-18: valeur annuelle brute de la production de la pomme de terre commercialisée – Bassin de la Tolomosa**

	Unité	Quantité
Surface	ha	2.694
Rendement	kg/ha	9.000
Production totale (1)	kg	24.246.000
Prix à la ferme	USD/kg BOB/kg	0,14 1,1
Valeur brute production	USD	3.333.825

(1) Sans compter les pertes à la récolte

## IV-3.5 PRODUCTION PASTORALE

### IV-3.5.1 SYSTEMES DE PRODUCTION

Le développement des systèmes de production pastorale dépend principalement des conditions écologiques de la terre et de l'altitude.

#### IV-3.5.1.1 Type d'exploitation

Dans le bassin versant de la Tolomosa, on ne rencontre pas d'exploitations spécialisées dans des spéculations animales. L'élevage est dispersé dans tout le bassin pratiquement sur toutes les unités de couverture végétales, sur une superficie d'environ 35.000 hectares (confer tableau I-12).

Le type d'exploitation le plus répandu sur les terres hautes et les versants des montagnes de la partie sud-ouest du bassin est l'exploitation familiale minifundiaire avec un élevage composé principalement d'ovins. Dans les zones irriguées des vallées du bassin (Guerrahuayco, San Andres, Bella Vista, Tolomosa), les bovins sont les plus répandus et servent aussi de force de travail. Ils sont considérés comme l'épargne familiale sur pied. L'accumulation de capital prend en général la forme d'un accroissement progressif de la taille des troupeaux de bovins. Dans le secteur nord, on trouve de grandes zones érodées où prédominent de petits agriculteurs/éleveurs de caprins. Le tableau IV-19 donne la répartition du bétail par localité et sous-bassin versant (sources: SENASAG, registre de vaccination contre la fièvre aphteuse, 2005; INE, 2002).

**TABLEAU IV-19: superficie des pâturages et répartition du cheptel par localité et sous-bassin versant (sources: SENASAG, registre de vaccination contre la fièvre aphteuse, 2005; INE, 2002) – Bassin de la Tolomosa.**

Sous-bassin	Superficie pâturage (ha)	Localité principale	Cheptel		
			Bovin	Ovin	Caprin
TolomosaA	9.390	Guerrahuayco	1.735	2.605	279
		San Andres	1.774	1.203	955
		San Pedro de Sola	454	150	10
		Turumayo	717	913	172
		Autres	2.349	1.780	270
		S/total	7.029	6.651	1.686
Mena	5.204	Churquis	993	1.087	500
		Panti Pampa	523	536	208
		Pampa Redonda	1.654	1.281	344
		Tolomosa Grande	691	441	40
		S/total	3.861	3.345	1.092
Pinos	7.073	Bella Vista	1.046	751	15
		Pinos Norte	707	639	29
		Pinos Sud	661	738	113
		S/total	2.414	2.128	157
Sola	14.080	Calderilla	292	1461	133
		Autres	101	208	146
		S/total	393	1.669	279
<b>TOTAL</b>	<b>35.747</b>		<b>13.694</b>	<b>13.793</b>	<b>3.214</b>

A la lecture du tableau IV-19 ci-dessus, on constate que les troupeaux de bovins sont pratiquement aussi importants que ceux des ovins dans le bassin versant, avec chacun 13.000 têtes environ. La répartition géographique du bétail est, par contre, différente et est fonction des caractéristiques écologiques et de l'altitude. La plus grande densité d'ovins par habitant se trouve dans les sous-bassins de Pinos et Sola où prédominent les hautes terres. Dans les sous-bassins de TolomosaA et de Mena prédominent les bovins. Les caprins par contre se rencontrent principalement dans les grandes zones de terre érodée au nord du bassin.

Le tableau IV-20 donne la répartition du cheptel bovin par sous-bassin (SENASAG, 2005).

**TABLEAU IV-20: répartition du cheptel bovin par sous-bassin (source: SENASAG, 2005) – Bassin de la Tolomosa**

<b>Cheptel bovin</b>	<b>TolomosaA</b>	<b>Mena</b>	<b>Sola</b>	<b>Pinos</b>
Vache en lactation	1.154	665	60	317
Vache sans lactation	997	689	66	423
Taureau	360	160	18	107
Bœuf	1.339	464	54	393
Veau	1.154	665	60	317
Génisse	948	600	71	426
Taurillon	419	318	26	210
Bouvillon	658	300	38	221
<b>TOTAL</b>	<b>7.029</b>	<b>3.861</b>	<b>393</b>	<b>2.414</b>

En fonction de la carte d'aptitude pour l'élevage extensif de bovins (confer carte de la figure IV-3), la charge animale moyenne est une tête par hectare. En prenant l'ensemble de la superficie actuellement pâturée, la charge animale est théoriquement de 0,38 tête par hectare ou, pratiquement, une tête pour trois hectares, valeur recommandée par SENASAG pour les bassins versants similaires à celui de la Tolomosa. Cependant, cette charge varie avec l'emplacement, la formation végétale (appétence) et l'accessibilité. Si on compte les ovins, la charge animale double et provoque une dégradation des sols et, dans certains secteurs, l'extinction d'espèces fourragères locales. Dans la suite de l'étude, on ne tiendra pas compte des caprins vu leur nombre peu élevé.

#### **IV-3.5.1.2 Système et moyen de production**

L'élevage est une activité généralement réservée aux femmes et aux enfants qui sont responsables de conduire le bétail vers les pâturages et le ramener le soir. Cette activité se développe sur la base d'un système extensif sur prairies naturelles avec des conséquences négatives de sur-pâturage et de charge animale trop élevée.

Dans les parties hautes situées à l'ouest du bassin, l'élevage d'ovins est fondamental pour l'économie campagnarde et fournit une bonne partie des recettes économiques familiales grâce à la vente de la laine utilisée pour la production de tissus artisanaux. Dans les vallées et têtes de vallées, on trouve principalement des bovins avec une relation très étroite entre l'agriculture et l'élevage. En effet, les systèmes de cultures ont aussi pour but de fournir aux animaux une part de leur alimentation (productions fourragères spécifiques, résidus de récoltes, etc.). De nombreux paysans élèvent en plus du petit bétail (volailles, lapins, cobayes, cochons, etc.) dans les jardins et vergers situés aux abords de leurs habitations en les alimentant avec les déchets de cuisine, les fanes de légumineuses et les sous-produits de décortilage. Les fientes et déjections animales servent à la fertilisation organique des parcelles destinées aux cultures sarclées.

Cependant, pour la plupart des éleveurs, cette association agriculture-élevage ne permet pas de résoudre le problème de l'équilibre entre les disponibilités fourragères et les besoins alimentaires des animaux, surtout dans les zones du bassin versant couvertes par des terres marginales à faible rendement agricole. Les exploitants se trouvent souvent contraints soit de vendre leurs animaux après le pâturage des chaumes en début de saison sèche, soit de migrer avec les troupeaux à partir des mois de mai et juin jusqu'au mois de novembre, vers les alpages ou des zones plus humides en quête de pâturages (transhumance).

Il n'existe pas de système de production basé sur un ensemble ordonné d'interventions dans les domaines de la sélection, de la reproduction, de l'alimentation, de l'hygiène et de la santé animale. Il n'y a pas de gestion de pâturages au sein du bassin (aucune rotation). La reproduction est fonction de la monte libre. Le suivi sanitaire, souvent rudimentaire, dépend des connaissances du propriétaire. La présence du bétail près des habitations avant la transhumance des mois d'avril et mai permet à certains éleveurs d'effectuer un contrôle sanitaire des bovins principalement (fièvre aphteuse).

Les moyens de production sont traditionnellement axés sur l'élevage extensif. Le capital fixe d'exploitation tel qu'outils, bâtiments d'élevage ou animaux reproducteurs est pratiquement inexistant. Les bovins servent de transport et fournissent l'énergie de traction nécessaire à la culture attelée. Ils sont aussi considérés par les éleveurs comme une épargne sur pied.

Les produits obtenus de l'élevage des bovins sont commercialisés tels que la viande et le lait. Les produits dérivés de l'élevage d'ovins et caprins sont principalement auto-consommés ou commercialisés dans la zone et sporadiquement dans la ville de Tarija (viande et fromage) (PEA, 2004). La laine des ovins de la partie montagneuse à l'ouest du bassin est vendue aux ateliers de tissage de la zone de Tajzara située une quinzaine de kilomètres environ au nord-ouest de Calderilla.

#### IV-3.5.2 PRODUCTION

La viande et le lait des bovins et, dans une moindre mesure la laine des ovins représentent la production pastorale principale du bassin versant. La production annuelle brute de lait ainsi que le revenu sont donnés dans le tableau IV-21. La période de production considérée est de 120 jours par an.

**TABLEAU IV-21: production annuelle brute de lait et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) – Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Vache en lactation (N°)	Production brute			Revenu total brut (USD)
		(l/vache/jour)	(l total/jour)	(l/an)	
TolomosaA	1.154	4	4.616	553.920	88.627
Mena	665	4	2.660	319.200	51.072
Sola	60	4	240	28.800	4.608
Pinos	317	4	1.268	152.160	24.346
<b>TOTAL</b>	<b>2.196</b>		<b>8.784</b>	<b>1.054.080</b>	<b>168.653</b>

Un litre de lait = 0,16 USD

La production annuelle brute de viande ainsi que le revenu sont donnés dans le tableau IV-22, considérant une commercialisation annuelle moyenne de dix pour cent du cheptel et en supposant que l'effectif total reste constant.

**TABLEAU IV-22: production annuelle brute de viande et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Production de viande					Revenu brut	
	Vache sans lactation (N°)	Taureau (N°)	Boeuf (N°)	Unitaire (kg/animal)	Total (1) (kg)	(USD/kg)	(USD total)
TolomosaA	997	360	1.339	300	80.880	2	161.760
Mena	689	160	464	300	39.390	2	78.780
Sola	66	18	54	300	4.140	2	8.280
Pinos	423	107	393	300	27.690	2	55.380
<b>TOTAL</b>	<b>2.175</b>	<b>645</b>	<b>2.250</b>		<b>152.100</b>		<b>304.200</b>

(1) On considère une vente annuelle de 10% du cheptel

La production annuelle brute de laine des ovins des terres hautes ainsi que le revenu sont donnés dans le tableau IV-23. La viande et le lait sont principalement auto-consommés (PEA, 2004).

**TABLEAU IV-23: production annuelle brute de laine et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Ovin (1) (N°)	Production de laine		Revenu brut	
		Unitaire (kg/animal)	Total (kg)	(USD/kg)	(USD total)
Sola	1.702	0,7	1.192	0,8	953
Pinos	1.335	0,7	935	0,8	748
<b>TOTAL</b>	<b>7.442</b>		<b>5.209</b>		<b>1.701</b>

(1) On considère 80% du cheptel comme producteur de laine

A la lecture du tableau IV-23 ci-dessus, on constate que les revenus de la production de laine du bassin versant sont négligeables par rapport à la production de viande et lait.

La production annuelle brute de viande ovine ainsi que le revenu sont donnés dans le tableau IV-24.

**TABLEAU IV-24: production annuelle brute de viande ovine et revenu (source: enquêtes ponctuelles de terrain; PEA, 2004; Beck et al., 2001) - Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	Ovin (1) (N°)	Production de viande		Revenu brut	
		Unitaire (kg/animal)	Total (kg)	(USD/ kg)	(USD total)
TolomosaA	665	30	19.953	1,4	27.934
Mena	334	30	10.035	1,4	14.049
Sola	212	30	6.384	1,4	8.937
Pinos	166	30	5.007	1,4	7.009
<b>TOTAL</b>	<b>1.379</b>		<b>41.379</b>		<b>57.931</b>

(1) On considère un abattage annuel de 10% du cheptel

La production de viande ovine s'élevé à 57.931 USD. Rappelons que cette production est considérée comme auto-consommée.

La valeur moyenne annuelle de la production bovine brute commercialisée du bassin versant est de 472.853 USD. Si on ajoute la production ovine de laine et de viande, la production pastorale annuelle brute commercialisée et non commercialisée du bassin est de 532.485 USD.

En considérant une consommation journalière moyenne de 35 litres d'eau par jour par tête de bétail, le total journalier consommé est de 1.060 m<sup>3</sup> avec 30.311 animaux (confer tableau IV-19). La consommation annuelle moyenne est de 387.265 m<sup>3</sup>. Ce volume d'eau est considéré comme négligeable par rapport à l'écoulement total annuel à l'exutoire du bassin versant pour le calcul de l'allocation de l'eau dans le bassin.

### IV-3.6 PRODUCTION SYLVICOLE

A l'heure actuelle, le rôle principal des ressources sylvicoles du bassin versant est de pourvoir aux besoins locaux humains (bois d'œuvre, de service et énergie) et du bétail (fourrage ligneux aérien ou abrutage<sup>1</sup>).

Les techniques d'exploitation sont rudimentaires (abattage à la hache ou la scie; débardage manuel).

Les superficies arborées dans le bassin versant sont petites et considérées comme négligeables.

## IV-4 RESULTATS DE LA FONCTION HEDONIQUE

### IV-4.1 VARIABLES EXPLICATIVES

Suite aux observations de terrain, certaines variables explicatives parmi la vingtaine envisagée ont été progressivement supprimées, soit à cause de leur faible variabilité ou de leur colinéarité (drainage et perméabilité; qualité de l'eau potable et d'irrigation; couverture végétale et occupation des terres), soit par manque de données fiables ou, enfin, à cause du peu d'intérêt pour l'étude.

Onze variables explicatives sont finalement retenues pour définir les caractéristiques d'une propriété rurale dans les sous-bassins de TolomosaA, Mena et Pinos. Ces onze variables et leur comportement supposé sont donnés dans le tableau IV-25. La variable dépendante continue PRIX, exprimée en millier de dollars par hectare (10<sup>3</sup> USD/ha), représente le prix effectif d'achat et de vente du terrain, sans comprendre les impôts et le coût de transaction.

<sup>1</sup> Ramoneo

**TABLEAU IV-25: variables explicatives de la fonction hédonique et comportement supposé**

Variable	Type	Signification	Comportement supposé
1. TAMANO	Continue	Superficie du terrain (ha). Exprime la différence de prix en fonction de la taille.	Plus grand est le terrain, plus petit est son prix à l'hectare et inversement.
2. Z	Continue	Pente du terrain (%). Exprime la différence de prix des terrains en fonction de la pente.	Plus le terrain est plat (faible pente), plus le prix s'élève et inversement.
3. PROFEFEC	Dichotomique	Profondeur effective du sol. Exprime la différence de prix entre les terrains avec un sol profond ou superficiel.	Sol profond, prix plus élevé et inversement. Valeur 1 si profondeur $\geq 50$ cm; valeur 0 si profondeur $< 50$ cm.
4. DREIN	Dichotomique	Drainage interne du sol. Exprime la différence de prix entre les terrains avec une bonne infiltration et les terrains avec une infiltration modérée.	Sol avec bonne infiltration et peu de ruissellement, prix plus élevé et inversement. Valeur 1 pour les sols des groupes hydrologiques A et B; valeur 0 pour sols des groupes C et D.
5. EROSA	Dichotomique	Degré de l'érosion actuel. Exprime la différence de prix entre les terrains avec ou sans érosion.	Degré d'érosion élevé, prix bas du terrain et inversement. Valeur 1 pour les degrés d'érosion de 1 à 2; valeur 0 pour les degrés de 3 à 5 (confer carte de la figure I-10).
6. APTAGRI	Dichotomique	Capacité de production pour un type d'utilisation déterminée. Exprime la différence de prix entre les terrains à vocation agricole et non agricole.	Meilleure aptitude agricole, meilleur prix. Valeur 1 pour la classe d'aptitude II; valeur 0 pour les classes d'aptitude III ou IV (confer carte de la figure IV-1).
7. USAC	Dichotomique	Occupation ou utilisation actuelle des terres. Exprime la différence de prix entre les terres avec ou sans agriculture.	Occupation agricole, meilleur prix; occupation non agricole, prix plus bas. Valeur 1 pour une occupation AGRC des terres; valeur 0 pour les autres unités (confer tableau II-17).
8. RIEGO	Dichotomique	Disponibilité en eau d'irrigation. Exprime la différence de prix entre terrains avec et sans système d'irrigation.	Irrigation disponible, prix plus élevé et inversement. Valeur 1 si disponible; valeur 0 si non disponible.
9. ENEL	Dichotomique	Disponibilité d'énergie électrique à la parcelle. Exprime la différence de prix entre terrains avec et sans électricité.	Electricité disponible, prix plus élevé et inversement. Valeur 1 si disponible sur le terrain; valeur 0 si non disponible.
10. AGUAPOT	Dichotomique	Disponibilité en eau potable. Exprime la différence de prix entre terrains avec et sans eau potable.	Eau potable disponible, prix plus élevé et inversement. Valeur 1 si disponible; valeur 0 si non disponible.
11. INCEN	Dichotomique	Degré de risque d'incendie de broussailles. Exprime la différence de prix entre terrains avec un degré majeur ou mineur de risque d'incendie de broussailles.	Degré du risque 1 et 2, prix plus élevé; degré du risque 3 à 5, prix plus bas. Valeur 0 pour les degrés de risques bas (degré 1 et 2); valeur 1 pour les autres (1).

(1) Pour cette variable, nous avons consulté la carte des risques d'incendie dans le bassin versant établie par la préfecture

## IV-4.2 RELATION EMPIRIQUE

La forme fonctionnelle permettant de lier le prix observé d'un terrain d'une part et les caractéristiques et le terme d'erreur relatif à ce terrain d'autre part est donnée ci-dessous:

$$\text{PRIX}_i^{(\theta)} = \beta_0 + \beta_1 * \text{TAMANO}_i^{(\lambda)} + \beta_2 * Z_i^{(\lambda)} + \beta_3 * \text{PROFEFEC}_i + \beta_4 * \text{DREIN}_i + \beta_5 * \text{EROSA}_i + \beta_6 * \text{APTAGRI}_i + \beta_7 * \text{USAC}_i + \beta_8 * \text{RIEGO}_i + \beta_9 * \text{ENEL}_i + \beta_{10} * \text{AGUAPOT}_i + \beta_{11} * \text{INCEN}_i + \varepsilon_i$$

Les paramètres ( $\beta$ ) sont estimés à partir de méthodes usuelles d'estimations statistiques en minimisant la somme des carrés des écarts résiduels.

## IV-4.3 ANALYSE DES RESULTATS

### IV-4.3.1 COEFFICIENTS

Le tableau IV-26 donne les valeurs estimées révélées par le logiciel des coefficients de la fonction hédonique et les valeurs absolues des t statistiques (seuil de 5%) dans les cas des formes fonctionnelles sans restriction, avec la restriction  $\theta = \lambda$  de la Box-Cox restreinte et  $\theta = \lambda = 0$  de la forme double log. Les intervalles de confiance de  $\theta$  et  $\lambda$  de la transformation Box-Cox générale obtenus à partir des déviations standards estimées sont compris entre:  $\lambda \in [-0.41; 0.29]$ ;  $\theta \in [-0.22; 0.03]$ . Aussi, les formes fonctionnelles Box-Cox générale restreinte et log-log peuvent être envisagées. Rappelons que, lors de l'estimation de la valeur d'un paramètre, un intervalle de confiance est un intervalle supposé contenir avec un certain degré de confiance la valeur à estimer. Ici, l'intervalle de confiance de 95% (au seuil de risque de 5%) à 95% de chance de contenir la valeur du paramètre que l'on cherche à estimer.

Les résultats détaillés de chaque forme fonctionnelle fournis par le logiciel LIMDEP7 sont repris à l'annexe IV-3. Le signe et la significativité statistique des coefficients des variables indépendantes des trois formes fonctionnelles de l'équation hédonique (seuil de 5%) sont donnés dans le tableau IV-27. Le critère Akaike (AIC) est représenté sous la forme suivante:

$$\text{AIC} = 2k - 2\ln(L)$$

avec:

- L: vraisemblance
- k: nombre de paramètres du modèle

### IV-4.3.2 ANALYSE DES RESULTATS

L'évaluation et l'interprétation des résultats se basent sur:

- Signe des coefficients des variables indépendantes et intervalle de confiance
- Significativité statistique des coefficients des variables indépendantes en travaillant avec un risque de première espèce de cinq pour cent
- Ampleur des effets

L'analyse générale du tableau IV-27 montre que les résultats entre les différentes formes fonctionnelles sont assez semblables. On constate aussi que le signe positif de la constante se maintient pour toutes les formes fonctionnelles de l'équation et est significative dans toutes les formes fonctionnelles.

#### IV-4.3.2.1 Coefficients des variables

Le tableau IV-26 donne le signe et l'effet sur le prix du terrain des coefficients des variables indépendantes des trois formes fonctionnelles estimés à partir du logiciel LIMDEP7 en fonction de l'intervalle de confiance choisi. Rappelons que la t statistique indique si le coefficient de la variable est significativement différent de 0, c'est-à-dire si la variable influence le prix du terrain. Une valeur de la t statistique inférieure à 2 en valeur absolue indique que le coefficient n'est pas significativement différent de 0 ou que la variable n'affecte pas le prix du terrain considéré.

**TABLEAU IV-26: signe et significativité statistique des coefficients des variables indépendantes des trois formes fonctionnelles de l'équation hédonique (seuil de 5%)**

Variable	Coefficient et valeur absolue de la t-stat.		Restriction $\theta = \lambda = 0$	Significative au seuil 5%	Influence
	Sans restriction	Restriction $\theta = \lambda$			
1. TAMANO <sup>2</sup>	-0,26 (2,60)	-0,25 (2,74)	-0,37 (4,16)	Oui	Affecte prix terrain
t-stat.					
2. Z <sup>1</sup>	-0,03 (0,17)	-0,03 (0,20)	0,01 (0,06)	Non	N'affecte pas prix terrain
t-stat.					
3. PROFEFEC	-0,84 (2,24)	-0,83 (2,23)	-1,04 (2,64)	Oui	Affecte prix terrain
t-stat.					
4. DREIN	-0,35 (1,37)	-0,34 (1,36)	-0,43 (1,18)	Non	N'affecte pas prix terrain
t-stat.					
5. EROSA	-0,87 (4,18)	-0,88 (4,24)	-1,04 (4,92)	Oui	Affecte prix terrain
t-stat.					
6. APTAGRI	-0,93 (3,25)	-0,93 (3,24)	-1,12 (3,41)	Oui	Affecte prix terrain
t-stat.					
7. USAC	0,37 (2,06)	0,37 (2,05)	0,40 (1,97)	Oui (a)	Affecte prix terrain
t-stat.					
8. RIEGO	-0,12 (0,50)	-0,12 (0,49)	-0,20 (0,60)	Non	N'affecte pas prix terrain
t-stat.					
9. ENEL	0,92 (4,50)	0,93 (4,51)	1,11 (5,98)	Oui	Affecte prix terrain
t-stat.					
10. AGUAPOT	0,11 (0,59)	0,11 (0,60)	0,06 (0,26)	Non	N'affecte pas prix terrain
t-stat.					
11. INCEN	-0,37 (1,85)	-0,37 (1,85)	-0,39 (1,08)	Non	N'affecte pas prix terrain
t-stat.					
CONSTANTE	2,41 (2,43)	2,39 (2,49)	3,14 (3,14)	Oui	
t-stat					
$\lambda$	-0,062	-0,089	0		
$\theta$	-0,089	-0,089	0		
Caractéristiques	Dév. stand. = 0,643	Dév. stand. = 0,646	R <sup>2</sup> = 0,649		
Critère Akaike (AIC)	2,23	2,24	2,56		

(a) Significative à 10% pour la restriction N°3

On interprète les résultats du tableau IV-26 ci-dessus en prenant deux exemples. Le coefficient  $\beta_1$  de la variable continue indépendante TAMANO prend, suivant la forme fonctionnelle, les valeurs de -0,26, -0,25, et -0,37 avec respectivement une valeur de la t statistique égale à 2,60, 2,74 et 4,16. La t statistique, étant toujours supérieure (en valeur absolue) à 2 quelle que soit la transformation, indique que cette variable est significative et donc affecte le prix du terrain.

Par contre, la variable dichotomique AGUAPOT, dont le signe positif des coefficients estimés se maintient pour les différentes formes de l'équation, n'est pas significativement différente de zéro. Ceci semblerait indiquer que l'accès à l'eau potable n'affecte pas le prix du terrain. Il en est de même pour la variable RIEGO et DREIN. Enfin, les variables PROFEFEC et APTAGRI, dont le signe négatif des coefficients estimés se maintient pour les différentes formes de l'équation, ont un comportement contraire à celui espéré. Ces contradictions seront examinées lors de l'analyse de sensibilité ci-dessous.

#### IV-4.3.2.2 *Statistiques descriptives de la régression*

Le tableau IV-27 présente les valeurs des statistiques descriptives de la régression sur la variable dépendante et les variables indépendantes, dans le cas de la forme fonctionnelle (1) sans restriction.

**TABLEAU IV-27: résumé des statistiques descriptives de la régression**

Variable	Valeur moyenne	Ecart type (1)	Asymétrie	Kurtosis (2)	Valeur min.	Valeur max.	Observation (nombre)
<b>Dépendante</b>							
PRIX (USD)	13.289	22.421	2,68	10,37	309	118.000	87
<b>Indépendante continue</b>							
1. TAMANO (ha)	1,69	1,75	2,59	11,66	0,011	10	87
2. Z (%)	0,02	0,01	3,66	18,91	1	10	87
<b>Indépendante dichotomique</b>							
3. PROFEFEC	0,89	0,31	-2,59	7,69	0	1	87
4. DREIN	0,59	0,49	-0,40	1,15	0	1	87
5. EROSA	0,54	0,50	-0,16	1,01	0	1	87
6. APTAGRI	0,40	0,49	0,40	1,15	0	1	87
7. USAC	0,79	0,41	-1,44	3,06	0	1	87
8. RIEGO	0,84	0,37	-1,83	4,36	0	1	87
9. ENEL	0,56	0,50	-0,25	1,05	0	1	87
10. AGUAPOT	0,61	0,49	-0,45	1,19	0	1	87
11. INCEN	0,16	0,37	1,83	4,36	0	1	87

(1) Ou déviation standard. Quantité réelle positive qui caractérise la répartition de la variable autour de sa moyenne.

(2) Aussi appelé coefficient d'aplatissement. Correspond à une mesure de la pointicité ou de l'aplatissement relatif d'une fonction d'une variable aléatoire réelle par rapport à une distribution normale. Une valeur positive du kurtosis indique une distribution asymétrique et leptokurtique (courbe en pointe); une valeur négative indique une distribution asymétrique et platikurtique (courbe aplatie).

A la lecture du tableau IV-27 ci-dessus, on constate une certaine dispersion dans les valeurs des variables. Sur les quatre-vingt-sept terrains vendus, le prix moyen estimé par hectare est approximativement (à cause de l'erreur) de 13.289 USD, avec une valeur maximum de 118.000 USD et minimum de 309 USD. L'écart-type indique une grande dispersion dans les prix. L'asymétrie montre que la distribution n'est pas symétrique autour de la valeur moyenne et qu'un nombre limité de terrains est vendu à un prix très élevé. Cette dispersion serait due, entre autres, à la grande hétérogénéité biophysique du bassin.

Une analyse des résultats des variables continues du tableau IV-27 ci-dessus permet les constatations suivantes:

- TAMANO: la taille moyenne des 87 terrains vendus est d'environ 1,7 ha, avec une taille maximum de 10 ha et une taille minimum d'environ 0,01 ha. L'écart-type montre que la dispersion est importante pour la région avec un écart par rapport à la moyenne de 1,75.

L'asymétrie indique, comme dans le cas précédent, l'existence d'un nombre restreint de terrains de grande superficie.

- Z: la pente moyenne des terrains vendus est très faible, avec un maximum de 10% et un minimum de 1%. La déviation standard indique que l'écart par rapport à la moyenne est seulement de 0,01 qui correspond à une dispersion plutôt limitée. Par contre, comme l'indique le coefficient d'asymétrie, un nombre restreint de terrains possède une pente très forte.

Pour les variables dichotomiques, seule la valeur moyenne nous intéresse, car ni l'écart-type ni le coefficient d'asymétrie ne donnent une information supplémentaire par rapport à la valeur moyenne.

- PROFEFEC: environ 90% des terrains vendus ont des sols profonds.
- DREIN: environ 60% des terrains vendus correspondent aux groupes hydrologiques A et B.
- EROSA: environ 54% des terrains vendus présentent un degré d'érosion actuel correspondant à la classe sans érosion à érosion modérée.
- APTAGRI: environ 40% des terrains vendus ont une aptitude agricole.
- USAC: environ 79% des terrains vendus sont utilisés comme terre agricole.
- RIEGO: environ 84% des terrains vendus disposent d'un système d'irrigation.
- ENEL: environ 56% des terrains vendus possèdent de l'énergie électrique.
- AGUAPOT: environ 61% des terrains vendus ont de l'eau potable.
- INCEN: environ 84% des terrains vendus n'ont pas de probabilité de souffrir des conséquences d'un incendie.

#### IV-4.3.2.3 *Ampleur des effets*

L'étude des effets marginaux illustre les répercussions sur la probabilité qu'un évènement se produise lors d'un changement très minime dans la variable explicative. Pour les trois formes fonctionnelles, la variation marginale qui représente la variation du prix d'un terrain particulier due à l'augmentation unitaire de la valeur d'une variable explicative est calculée par la formule suivante:

$$dy/dx = \beta(x^{\lambda-1})/(y^{\theta-1})$$

avec:

x: variable explicative choisie

y: variable dépendante

L'élasticité est alors donnée par:

$$\frac{\frac{\delta y}{y}}{\frac{\delta x}{x}} = \beta x^{\lambda} y^{\theta}$$

Cependant, la plupart des variables explicatives de la forme fonctionnelle sont dichotomiques de sorte qu'il est difficile d'interpréter en réalité la signification d'un petit changement dans la variable explicative. De plus, comme les formes fonctionnelles donnent des résultats fort similaires et que la valeur 0 est comprise dans l'intervalle de confiance, nous utiliserons alors la forme fonctionnelle double log. ( $\theta = \lambda = 0$ ) pour sa plus grande simplicité d'interprétation des coefficients qui représentent une élasticité.

L'élasticité représente un changement en pourcentage du prix du terrain dû à une augmentation de 100% de la valeur d'une variable explicative. Elle est estimée sous la forme suivante:

$$\frac{\frac{\delta y}{y}}{\frac{\delta x}{x}} = \beta$$

avec:

x: variable explicative choisie

y: variable dépendante

Dans le cas de la fonction double log., l'élasticité correspond au coefficient de la variable explicative. Dans le cas d'une variable explicative dichotomique, l'élasticité est estimée par la forme suivante:

$$\frac{\frac{\delta y}{y}}{\frac{\delta x}{x}} = e^{\beta} - 1$$

Le tableau IV-28 donne le signe et la valeur des coefficients considérés comme significatifs des variables indépendantes continues et dichotomiques ainsi que l'élasticité pour la forme fonctionnelle de type double log. L'interprétation du tableau IV-29 ci-dessus se fait uniquement entre deux terrains ayant toutes les autres caractéristiques semblables. Le coefficient  $\beta_0$  de INTERCEP indique que, si tous les coefficients des variables de la régression prennent la valeur zéro (c'est-à-dire qu'on ne tient compte d'aucunes caractéristiques du terrain), le prix d'un hectare serait de 3.140 USD.

#### IV-4.3.3 ANALYSE DE SENSIBILITE

L'analyse de sensibilité a comme objectif de vérifier de quelle manière un changement dans les variables de la forme fonctionnelle affecte le prix d'un terrain agricole. On a constaté précédemment que les variables RIEGO, DREIN et AGUAPOT ne sont pas significativement différentes de zéro et que les variables PROFEFEC et APTAGRI ont un comportement contraire à celui espéré.

L'analyse de l'échantillon statistique montre que 82% des terrains qui possèdent de l'électricité ont aussi accès à l'eau potable. La variable ENEL (électricité) est fortement corrélée à la variable AGUAPOT (eau potable) et leurs effets se confondent. L'effet de l'eau potable dans l'équation fonctionnelle double log. est isolé en supprimant la variable ENEL. Les résultats sont présentés dans le tableau IV-28.

**TABLEAU IV-28: signe des coefficients associés aux variables indépendantes significatives et interprétation de l'élasticité pour la forme fonctionnelle double log. de l'équation hédonique**

Variable	Coefficient	Elasticité (%)	Interprétation
1. LNTAMANO	-0,37	-37	Si la taille de la parcelle double, le prix moyen par hectare diminue approximativement de 37%.
3. PROFEFEC	-1,04	-65	Le marché valorise plus un terrain peu profond. Un terrain avec une profondeur > 50 cm coûtera 65% moins cher qu'un terrain à caractéristiques similaires, mais ayant une profondeur < 50 cm.
5. EROSA	-1,04	-65	Le marché valorise moins un terrain érodé. Un terrain érodé coûte en moyenne 65% moins cher qu'un terrain à caractéristiques similaires, mais non érodé.
6. APTAGRI	-1,12	-67	Le marché valorise moins le terrain de classe II. Un terrain de classe II coûte 67% moins cher qu'un terrain à caractéristiques similaires, mais de classe III ou IV.
7. USAC	0,40	49	Le marché valorise un terrain à usage agricole. Un terrain actuellement utilisé à des fins agricoles coûte 50% plus cher qu'un terrain à caractéristiques similaires, mais non utilisé à des fins agricoles.
9. ENEL	1,11	203	Le marché valorise un terrain avec électricité. Le terrain pourvu d'électricité coûte plus de 200% plus cher qu'un terrain à caractéristiques similaires, mais sans accès à l'électricité.
INTERCEP	3,14		

**TABLEAU IV-29: valeurs des coefficients de la fonction hédonique (forme fonctionnelle double log.) et du t-ratio (valeurs absolues) avec et sans la présence de la variable dichotomique ENEL (intervalle de confiance de 5%)**

Variable	Restriction $\theta = \lambda = 0$	
	(avec variable ENEL)	(sans variable ENEL)
Nombre d'observations	87	87
1. LNTAMANO	-0,37	-0,35
t-ratio	(4,16)	(3,17)
2. LNZ	0,10	-0,21
t-ratio	(0,06)	(0,90)
3. PROFEFEC	-1,04	-0,90
t-ratio	(2,64)	(1,93)
4. DREIN	-0,43	-0,48
t-ratio	(1,18)	(1,23)
5. EROSA	-1,04	-1,15
t-ratio	(4,92)	(4,49)
6. APTAGRI	-1,12	-1,09
t-ratio	(3,41)	(3,09)
7. USAC	0,40	0,59
t-ratio	(1,97)	(2,70)
8. RIEGO	-0,20	0,12
t-ratio	(0,60)	(0,32)
9. ENEL	1,11	
t-ratio	(5,98)	
10. AGUAPOT	0,06	0,65
t-ratio	(0,26)	(2,79)
11. INCEN	-0,39	-0,50
t-ratio	(1,08)	(1,37)
CONSTANTE	3,14	2,12
t-ratio	(3,14)	(1,80)
$\lambda$	0	0
$\theta$	0	0

Le modèle révèle que les coefficients de AGUAPOT ont le signe positif et que cette variable est maintenant significativement différente de 0.

Le calcul du prix moyen par hectare donne 12.834 USD pour le bassin de TolomosaA, 21.737 USD pour Mena et 1.397 USD pour Pinos. Vu la forte différence constatée entre ces prix moyens, nous considérons la possibilité que les variables n'affectent pas les prix de la même manière dans les trois sous-bassins. Cette différence de prix est capturée en introduisant dans la forme fonctionnelle double log. deux variables dichotomiques identifiant les sous-bassins de Mena et Pinos pour les variables dichotomiques considérées comme importantes lors de l'achat d'un terrain agricole, à savoir RIEGO, EROSA, APTAGRI et USAC. Remarquons que la même opération peut évidemment se faire avec la forme générale.

L'équation prend alors la forme suivante (forme fonctionnelle double log.):

$$\begin{aligned} \text{PRIX}_i^{(\theta)} = & \beta_0 + \beta_1 * \text{TAMANO}_i^{(\lambda)} + \beta_2 * \text{Z}_i^{(\lambda)} + \beta_3 * \text{PROFEFEC}_i + \beta_4 * \text{DREIN}_i + \beta_5 * \text{EROSA}_i + \beta_6 * \text{APTAGRI}_i + \\ & \beta_7 * \text{USAC}_i + \beta_8 * \text{RIEGO}_i + \beta_9 * \text{ENEL}_i + \beta_{10} * \text{AGUAPOT}_i + \beta_{11} * \text{INCEN}_i + \beta_{12} * \text{MENA}_i + \beta_{13} * \text{PINOS}_i + \\ & \beta_{14} * \text{MENA}_i * \text{RIEGO}_i + \beta_{15} * \text{MENA}_i * \text{EROSA}_i + \beta_{16} * \text{MENA}_i * \text{USAC}_i + \beta_{17} * \text{PINOS}_i * \text{RIEGO}_i + \\ & \beta_{18} * \text{PINOS}_i * \text{EROSA}_i + \beta_{19} * \text{PINOS}_i * \text{USAC}_i + \varepsilon_i \end{aligned}$$

Le tableau IV-30 donne les résultats de l'analyse de sensibilité des coefficients des variables indépendantes identifiées de la forme fonctionnelle.

**TABLEAU IV-30: analyse de sensibilité des coefficients des variables indépendantes**

Variable	Restriction $\theta = \lambda = 0$ (avec APTAGRI)	Restriction $\theta = \lambda = 0$ (sans APTAGRI)
LNTAMANO	-0,37 (3,49)	-0,38 (3,37)
LNZ	0,13 (0,61)	0,17 (0,74)
PROFEFEC	-0,77 (2,77)	-0,08 (0,30)
DREIN	-0,02 (0,08)	0,55 (2,39)
EROSA	-1,03 (4,68)	-0,81 (3,93)
APTAGRI	-0,82 (3,71)	-- --
USAC	0,23 (0,99)	0,28 (1,26)
RIEGO	-0,13 (0,47)	-0,42 (1,43)
ENEL	1,23 (7,72)	1,28 (7,66)
AGUAPOT	-0,28 (1,72)	-0,26 (1,45)
INCEN	0,34 (0,98)	0,47 (1,32)
MENA	0,30 (0,67)	0,44 (0,74)
PINOS	-5,18 (6,39)	-5,71 (6,85)
MENA*RIEGO	-0,47 (1,28)	-0,15 (0,40)
PINOS*RIEGO	1,62 (5,34)	1,89 (5,94)
MENA*EROSA	0,71 (1,03)	1,27 (1,80)
PINOS*EROSA	1,78 (3,65)	1,96 (3,84)
MENA*USAC	0,29 (0,70)	-0,21 (0,39)
PINOS*USAC	1,16 (2,42)	1,21 (2,38)
ONE	3,19 (2,89)	2,08 (1,93)

La lecture du tableau IV-30 ci-dessus montre que, dans le cas de la forme fonctionnelle double log., les trois variables qui affectent différemment le prix d'un terrain dans les trois sous-bassins sont RIEGO, USAC y EROSA. En effet, on constate que:

- RIEGO est significatif uniquement dans le sous-bassin Pinos.
- USAC est significatif seulement dans le sous-bassin Pinos.
- EROSA est significatif dans le sous-bassin Pinos et TolomosaA.

Cependant, on constate que la variable APTAGRI est encore associée à un signe contraire à notre intuition. Aussi, une régression supplémentaire de type probit<sup>1</sup> porte sur la variable suspecte APTAGRI considérée comme une variable dépendante dichotomique avec les variables explicatives PROFEFEC, EROSA et DREIN qui sont liées à une bonne aptitude agricole. Le tableau IV-31 donne les valeurs des coefficients de la régression type probit ainsi que les valeurs absolues des t statistiques (intervalle de confiance de 5%).

**TABLEAU IV-31: valeurs des coefficients de la régression type probit et valeurs absolues des t statistiques (intervalle de confiance de 5%)**

Variable	Coefficient
INTERCEPTO	5,46
t de Student	(5,30)
PROFEFEC	-3,81
t de Student	(4,89)
DREIN	-3,16
t de Student	(4,88)
EROSA	-1,85
t de Student	(3,51)
N° d'observations	87
Pseudo R <sup>2</sup>	0,65

L'analyse du tableau IV-31 ci-dessus montre que les terres agricoles érodées sans drainage naturel et avec un sol peu profond sont codifiées comme ayant une bonne aptitude agricole. Ceci explique pourquoi la variable APTAGRI est corrélée négativement avec le prix.

Sur base de cette analyse, une nouvelle régression est proposée où la variable APTAGRI est exclue. Les résultats de cette régression se trouvent dans le tableau IV-30 ci-dessus (dernière colonne). La comparaison entre les deux colonnes du tableau IV-30 montre des résultats en général semblables sauf pour la variable PROFEFEC qui n'est plus significative. Très probablement, ceci est dû à la colinéarité qui existe entre cette variable et les variables RIEGO et EROSA. De plus, la variable DREIN devient maintenant positive et significative, de sorte que, pour les trois sous-bassins considérés, un terrain avec un bon drainage naturel coûte en moyenne 70% de plus qu'un terrain équivalent, mais sans bon drainage ( $e^{0,55}-1$ ).

Puisque la variable APTAGRI ne répond pas aux attentes dans le cas de la restriction  $\theta = \lambda = 0$ , l'estimation des coefficients des variables explicatives de la fonction des prix hédoniques de la colonne droite du tableau IV-30 représente le mieux la valorisation d'une propriété agricole dans les trois sous-bassins de Mena, Pinos et TolomosaA du bassin versant.

#### IV-4.4 CONCLUSIONS

Les résultats fournis par l'équation des prix hédoniques appliquée à quatre-vingt-sept terrains agricoles via le logiciel LIMDEP7 montrent une disparité dans les prix entre les trois sous-bassins TolomosaA, Mena et Pinos du bassin versant de la Tolomosa. Les caractéristiques du foncier qui influencent le prix du terrain (forme fonctionnelle double log.) dans le bassin versant de la Tolomosa sont résumées dans le tableau IV-32.

<sup>1</sup> Dans ce modèle, les erreurs suivent une distribution normale

**TABLEAU IV-32: caractéristiques du foncier selon la technique des prix hédoniques avec une forme fonctionnelle double log. (restriction  $\theta = \lambda = 0$ ) – Bassin versant de la Tolomosa**

Variable	Coefficient	t statistique (valeur absolue)
TAMANO	-0,38	3,37
DREIN	0,55	2,39
EROSA	-0,81	3,93
ENEL	1,28	7,66
PINOS*RIEGO	1,89	5,94
PINOS*EROSA	1,96	3,84
PINOS*USAC	1,21	2,98

Le tableau IV-32 ci-dessus indique que le prix du terrain est directement influencé par sa taille (avec un effet dégressif lorsque la superficie augmente), le drainage interne du sol, le degré d'érosion qui affecte les terres et l'accès à l'électricité.

Les résultats fournis par l'équation des prix hédoniques, dont certains paraissent aberrants au premier abord, peuvent être expliqués par la localisation des terrains et l'effet de la proximité de centres habités, et permettent de capter les conséquences du développement de la région et du bassin versant. Le prix du foncier dans le sous-bassin Pinos est fort influencé par l'accès à l'irrigation (RIEGO), le degré d'érosion des terres (PINOS\*EROSA) et l'usage agricole de la terre (PINOS\*USAC). Ce sous-bassin, situé au sud-ouest du bassin de la Tolomosa, est le plus éloigné du centre urbain de Tarija dont il est séparé par la rivière Sola (un pont est actuellement en construction) (confer carte de la figure I-3). Aussi, ce sous-bassin reste très rural et les résultats de la forme fonctionnelle de l'équation des prix hédoniques montrent que les composantes agricoles des terrains sont bien valorisées. Par contre, les deux autres sous-bassins TolomosaA et Mena sont beaucoup plus proches de Tarija et jouissent de liens commerciaux nombreux et diversifiés avec la ville. On constate aussi l'urbanisation et le développement touristique des environs du réservoir de San Jacinto (constructions de secondes résidences, parcs, etc.) au détriment de l'agriculture. La valorisation de la terre est alors influencée par d'autres critères que ceux liés proprement à l'agriculture (terrains à bâtir, logement, etc.).

Ces résultats suggèrent la division du bassin versant en deux zones distinctes: celle du sud-ouest, montagneuse et agricole (sous-bassin Pinos et Sola) et celle du nord-est, plus soumise à l'influence économique de la ville de Tarija (Tolomosa A et Mena). Dans ces conditions, une vocation agricole à long terme pour le bassin versant de la Tolomosa n'est plus envisageable. Il convient d'interpréter les données avec prudence au regard notamment de leur dispersion.

## **IV-5 SCENARIO DE DEVELOPPEMENT**

### **IV-5.1 CHOIX DU SCENARIO**

Comme le bassin est considéré dans les plans de développement des institutions publiques et privées du département comme un bassin versant rural, les activités productives et les scénarios envisagés sont axés sur un développement de la production agricole, pastorale et forestière.

On suppose que le développement du bassin versant de la Tolomosa a pour but d'augmenter la production économique grâce à des changements dans l'occupation des terres sous forme de scénarios productifs. Pour que les scénarios proposés conduisent à un développement réaliste dans le contexte du bassin, nous supposons que chacun d'eux est limité par le potentiel rural présent basé principalement sur l'aptitude des terres en fonction d'une exploitation donnée.

Un scénario de développement à vocation agricole du bassin implique que les cultures envisagées ne se trouvent que sur des terres aptes à cette activité. De plus, ce scénario suppose que les agriculteurs ne cherchent plus à cultiver les terres marginales. Un scénario de développement sylvicole du bassin implique l'utilisation de terres à aptitude sylvicole. Enfin, une vocation pastorale du bassin implique, comme pour les autres scénarios, des terres aptes à l'élevage.

Les résultats fournis par le logiciel LIMDEP7 via l'équation des prix hédoniques écartent le scénario basé sur la seule production agricole. La carte d'aptitude sylvicole des terres du bassin versant (confer carte de la figure IV-4) montre qu'il existe un potentiel important et totalement sous-exploité à l'heure actuelle puisque seulement quatre-vingts hectares sont plantés d'arbres (confer tableau I-12). Comme constaté précédemment, l'élevage est intrinsèquement lié à toutes les activités productives du bassin versant. Or, la carte d'aptitude élaborée pour l'élevage extensif de bovins (confer carte de la figure IV-3) ne présente pas de zones aptes à ce type d'exploitation de sorte que l'élevage n'est pas envisagé comme un scénario de production à part entière, mais plutôt comme un complément du scénario sylvicole. Aussi, parmi les scénarios de développement envisageables, seul le scénario sylvo-pastoral répond adéquatement aux conditions imposées par le bassin versant de la Tolomosa. Au développement sylvo-pastoral du bassin versant s'ajoute la production d'énergie hydroélectrique.

Nous sommes conscients de l'approche théorique et de l'aspect extrême qui ont conduit au choix de ce scénario pour évaluer les ressources et la valeur de l'eau avec une couverture forestière idéalisée et sans tenir compte des conditions d'exploitation/débardage qui pourraient changer.

Le tableau IV-33 donne la répartition de la surface des terres en fonction des scénarios de développement envisageables pour le bassin versant.

## IV-5.2 PRODUCTION DU BASSIN

La production du bassin versant est estimée dans le cas de l'application du scénario sylvo-pastoral.

### IV-5.2.1 TAUX D'ESCOMPTE

Lors de l'application d'un scénario, toutes les valeurs monétaires doivent être actualisées à la valeur présente pour pouvoir comparer les données financières entre elles.

La valeur actuelle nette est donnée par la formule:

$$VPN = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{Bt - Ct}{(1+r)^t}$$

avec:

Bt: bénéfice de l'année t

Ct: coût de l'année t

r: taux d'escompte exprimé en décimale

Le taux d'escompte utilisé est de 10,10% (Secrétariat national des investissements publics) et le taux d'inflation annuel moyen de 2,98%, calculé sur la période de 2000 à 2005.

### IV-5.2.2 PRODUCTION HYDROELECTRIQUE

Le Projet Multiple San Jacinto, dans sa relation commerciale avec la coopérative SETAR s.a. fournissant l'électricité aux consommateurs de la ville de Tarija, est obligé de livrer la quantité annuelle minimum d'énergie électrique de 20.106 kWh (ou 1.750 kW par turbine). La vente de l'énergie électrique à la coopérative SETAR ne se fait pas dans le cadre d'un marché libéralisé. Le prix du kWh fourni n'est pas fonction d'un marché concurrentiel, mais reflète le fruit d'une décision de politique départementale qui échappe à la compétence du PMSJ.

### IV-5.2.3 PRODUCTION AGRICOLE

Lors de la mise en œuvre du scénario sylvo-pastoral, les terres agricoles de classe d'aptitude II sont progressivement recouvertes par la sylviculture. En conséquence, la production agricole n'occupe plus qu'une surface de 1.161 hectares sur des terres marginales (confer tableau IV-33). La valeur de la production est alors considérée comme négligeable et supposée auto-consommée.

Nous reconnaissons que, comme dicté par la lecture des cartes d'aptitudes des terres, remplacer les terres agricoles d'aptitude moyenne par la sylviculture en repoussant l'agriculture sur des terres marginales, peut être difficilement applicable, tenant compte par exemple du revenu annuel important généré par l'agriculture dans le bassin versant. Ce choix est guidé par les résultats obtenus précédemment et ne tient pas compte de la durabilité sociale et de l'impact engendré par son application.

**TABLEAU IV-33: répartition des terres par scénario envisageable de développement économique du bassin – Bassin de la Tolomosa.**

Usage	Superficie agricole		Superficie pastorale			Superficie boisée			Autre (1) (ha)	Total bassin versant (ha)
	Aptitude moyenne (ha)	Aptitude marginale (ha)	Aptitude moyenne (ha)	Aptitude marginale (ha)	Inapte (ha)	Aptitude élevée (ha)	Aptitude moyenne (ha)	Aptitude marginale (ha)		
Situation actuelle	2.694	3.499	--	14.238	20.762	Négligeable	Négligeable	Négligeable	2.479	43.672
Scénario agricole	2.694	--	--	14.238 3.499 (2)	20.762				2.479	43.672
Scénario sylvo-pastoral	--	1.161	--	14.238	20.762	1.217	13.159		2.479	43.672

(1) Plans d'eau, affleurements rocheux, habitations, etc.

(2) Terres agricoles marginales cultivées actuellement, mais exclues du scénario et reprises pour l'élevage extensif

#### IV-5.2.4 PRODUCTION PASTORALE

Les zones de pâturages occupent une superficie totale approximative de 35.000 hectares dans le cas de la situation sans projet (confer tableau I-12). Lors de la mise en œuvre du scénario sylvo-pastoral, on constate que la surface se réduit à une superficie de 29.395 hectares, dont 14.238 hectares de terres marginales pour les bovins (confer tableau IV-5) et 15.157 hectares pour les ovins (confer tableau IV-4). La différence entre les superficies occupées actuellement et celles du scénario est donc négligeable, permettant d'obtenir de nouvelles possibilités et sources d'alimentation pour le bétail telles que la culture du fourrage nécessaire. Or, les pâturages couvrent principalement des terres marginales et toutes les terres agricoles aptes sont appropriées par le scénario sylvicole, ce qui rend difficile une augmentation de la production d'aliments pour le cheptel bovin. Ces conditions naturelles très restrictives empêchent de considérer une amélioration substantielle de la production laitière et de viande sur la base de l'élevage extensif. Aussi, la valeur de la production du bassin versant des activités pastorales ne devrait pas varier de manière significative entre les deux situations envisagées.

#### IV-5.2.5 PRODUCTION FORESTIERE

##### IV-5.2.5.1 Essences forestières

Les essences choisies pour le développement du scénario sylvo-pastoral du bassin versant sont les essences natives les plus prospères et les plus répandues dans la région (Casal 2003; PEA, 2004; Zonisig(b), 2001; Beck, 1999; PROBONA, 1995; Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente, 1995; Coro 1984; CODETAR, 1980). Elles sont économiquement utiles pour les besoins des communautés locales (source d'énergie et bois commercialisable) et appréciées par les animaux d'élevage (arbre fourrager). Ces essences comprennent le jaúl ou aliso (*Alnus acuminata*), le guaranguay (*Tecota stans*), le jarca (*Acacia visco*), le pin des montagnes (*Podocarpus parlatorei*) et l'eucalyptus (*Eucalyptus*) et sont décrites à l'annexe IV-4.

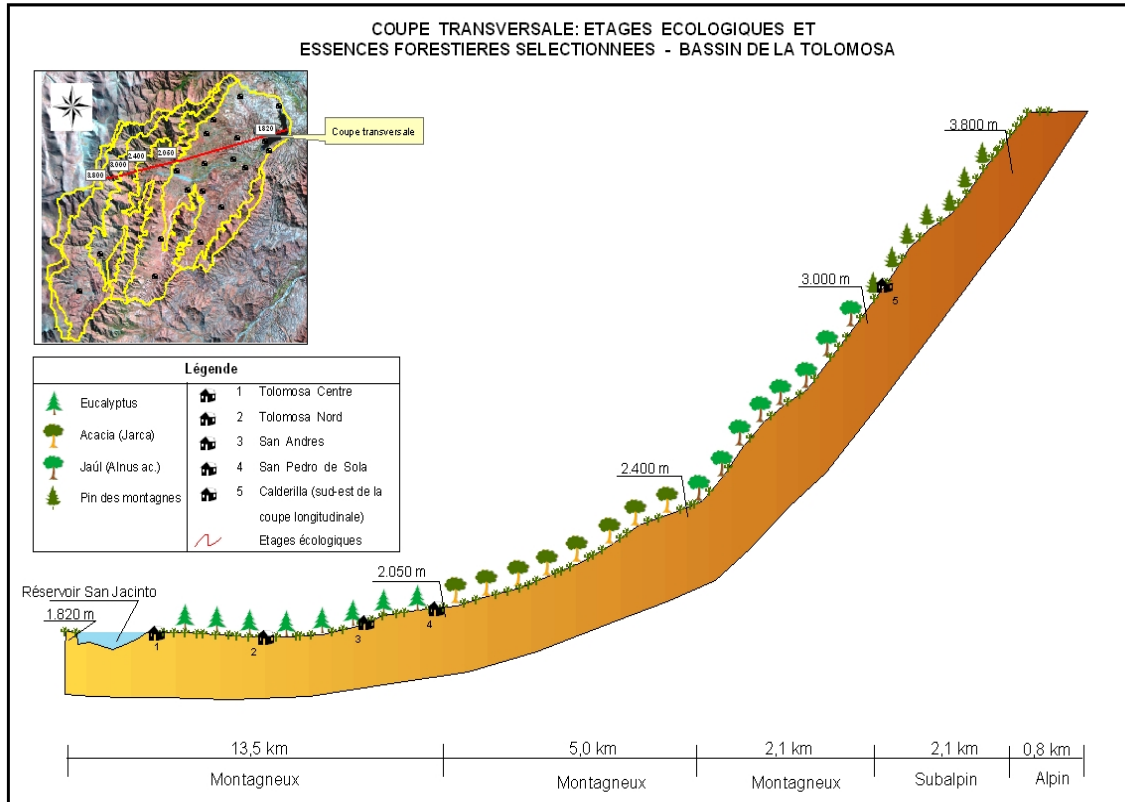
Le tableau IV-34 indique la surface des terres aptes (classes I et II) pour un développement sylvicole par étage écologique. Ces données sont issues du croisement de l'information de la carte d'aptitude forestière avec la carte des étages écologiques (confer cartes des figures IV-4 et I-9).

**TABLEAU IV-34: superficie des terres aptes au scénario sylvo-pastoral par étage écologique et en % du bassin - Bassin de la Tolomosa**

Etage écologique	Surface de classe I		Surface de classe II	
	(ha)	(% BV)	(ha)	(% BV)
Montagneux	1.217	3	12.557	29
Subalpin			907	2
Alpin				
<b>TOTAL</b>	<b>1.217</b>	<b>3</b>	<b>13.159</b>	<b>31</b>

L'analyse du IV-33 ci-dessus indique que les terres aptes au développement sylvicole se trouvent principalement à l'étage écologique montagneux couvrant 29% du bassin versant.

La figure IV-12 situe les essences forestières recommandées pour le scénario sylvicole sur une coupe transversale du bassin versant. Cette coupe transversale montre les étages écologiques et s'étend du réservoir de San Jacinto jusqu'à la localité de San Pedro de Sola dans la partie nord du bassin.



**FIGURE IV-12: coupe transversale du bassin et essences forestières recommandées (scénario sylvo-pastoral) – Bassin de la Tolomosa**

Le tableau IV-35 montre, par étage écologique, la répartition et la surface des essences forestières proposées pour le scénario. La superficie est obtenue en croisant la carte des étages écologiques avec celle d'aptitude forestière et en tenant compte du type d'essence recommandée en fonction de l'altitude.

**TABLEAU IV-35: essence forestière, altitude et surface du scénario sylvo-pastoral par étage écologique – Bassin de la Tolomosa**

Etage écologique	Altitude (m)	Essence		Surface	
		Nom commun	Nom scientifique	(ha)	(%)
Montagneux	1.820-2.050	Eucalyptus	<i>Eucalyptus</i>	8.771	61
	2.050-2.400	Jarca Guaranguay	<i>Acacia visco</i> <i>Tecota stans</i>	2.876	20
	2.400-3.000	Aliso	<i>Alnus acuminata</i>	1.725	13
Subalpin	3.000-3.800	Pin des montagnes	<i>Podocarpus parlatorei</i>	902	6
Alpin	> 3.800	---	---	--	--
<b>TOTAL</b>				<b>14.376</b>	<b>100</b>

La distribution spatiale des unités d'occupation du sol dans le cas d'un développement sylvo-pastoral du bassin versant est reprise à la figure IV-13. Cette carte a été obtenue par le croisement de l'information de la carte d'aptitude sylvicole avec celle de l'occupation actuelle des terres.

#### **IV-5.2.5.2 Période de production**

L'échelle temporelle considérée pour le développement et l'exploitation d'une unité spatiale du scénario sylvo-pastoral correspond approximativement à une génération humaine. Le scénario sylvo-pastoral couvre une période de trente ans, avec une phase de plantation des arbres sur une période moyenne de quinze ans et une phase productive sur les quinze années suivantes. Aussi, on suppose

que les caractéristiques géomorphologiques (forme et évolution du relief) ne varient pas dans le bassin versant.

Selon les pratiques rencontrées dans le département de Tarija, l'étude considère que les essences sont commercialisables après une période moyenne de 15 ans. Pour la facilité du calcul, la plantation des 14.376 hectares se fera de manière linéaire avec 948 hectares par an. La vente débutera à partir de la deuxième période de 15 ans, avec 948 hectares de bois abattus et vendus annuellement.

#### **IV-5.2.5.3 Volume de production**

Le développement du secteur sylvicole ne considère aucun changement important dans la gestion forestière. Aucune fertilisation et amélioration des conditions de croissance ou génétiques ne sont apportées. La mécanisation reste rudimentaire.

Le volume de bois commercial par arbre est donné par la formule suivante:

$$V_{\text{arbre}} = 0,65 \cdot \pi \cdot A_b \cdot h_c$$

avec:

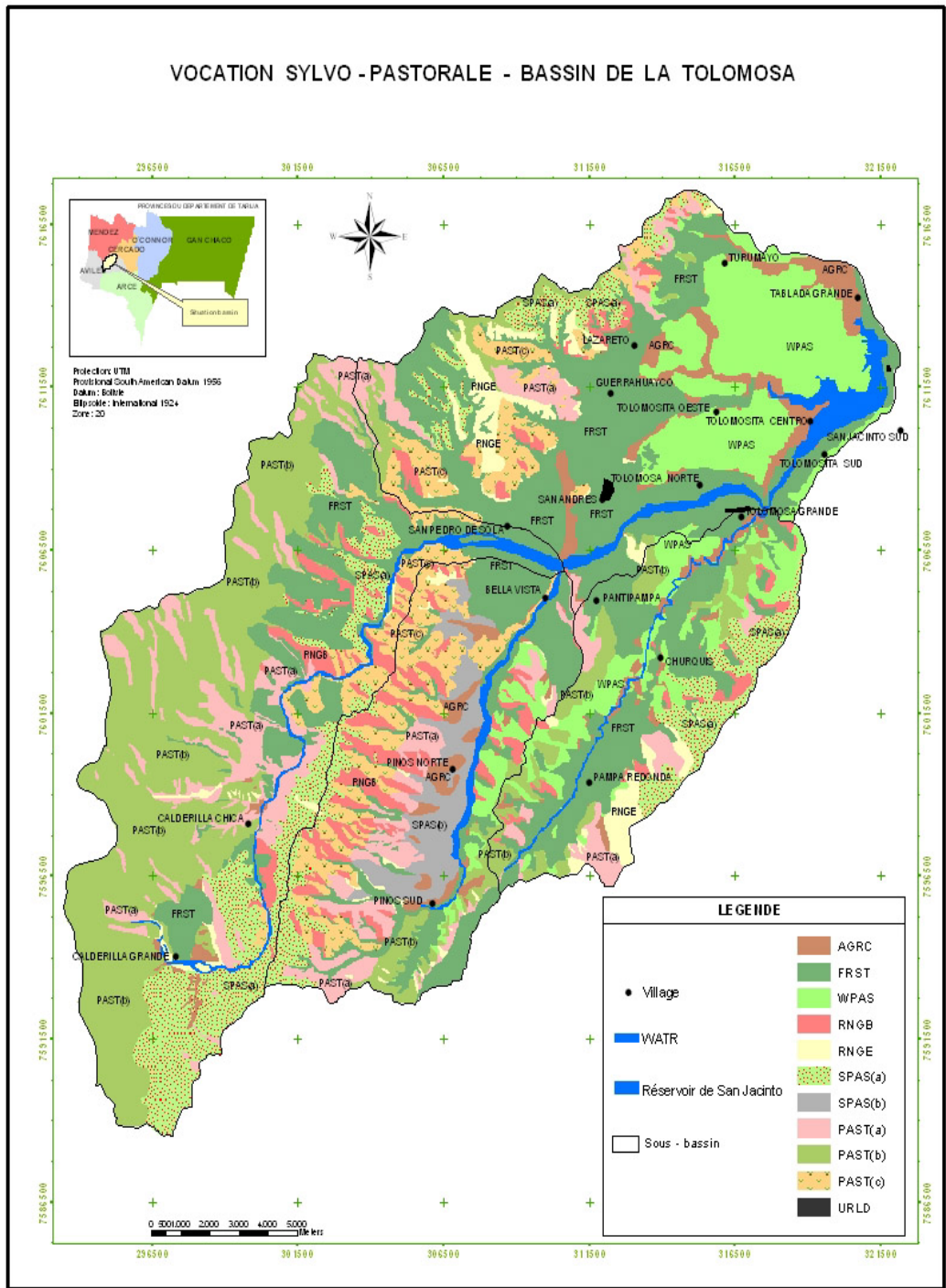
$V_{\text{arbre}}$  : volume de l'arbre ( $m^3$ )  
 $A_b$ : aire de la base à 1,30 m ( $m^2$ )  
 $h_c$ : hauteur commercialisable (m)  
0,65: facteur de forme selon Heinsentz

et:

$A_b = \pi \times d^2/4$   
 $= 0,7854 \times (Cap/\pi)^2 (m^2)$   
considérant que  $d = Cap/\pi$  (Cap est la circonférence à 1,30 m du sol)

Selon les pratiques courantes rencontrées dans le département, on considère une densité de 2.500 plantes par hectare pour l'eucalyptus et le pin des montagnes (2 m x 2 m). Après une période de 15 ans (période minimum nécessaire avant la commercialisation), il ne reste plus qu'une densité de 1.500 arbres par hectare (maladies, éclaircies, etc.). Dans le cas des espèces natives, la densité initiale est de 2.000 plantes par hectare (2 x 2,5 m). Après une période de 15 à 20 ans (période minimum nécessaire avant la commercialisation), il ne reste plus qu'une densité de 1.200 arbres par hectare (maladies, éclaircies, etc.).

Le tableau IV-36 donne le volume total en mètre cube de la production de bois dans le cas de l'application du scénario silvo-pastoral dans le bassin versant.



**FIGURE IV-13: carte des unités d'occupation des terres du scénario de développement sylvo-pastoral – Bassin de la Tolomosa**

**TABLEAU IV-36: estimation du volume de la production de bois dans le cas du scénario à vocation sylvicole – Bassin de la Tolomosa**

Essence	Superficie plantée (ha)	Cap (1) (m)	h <sub>c</sub> (*) (m)	A <sub>b</sub> (m <sup>2</sup> )	V <sub>arbre</sub> (m <sup>3</sup> )	Densité (N°/ha)	V <sub>arbre</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	Production de bois (m <sup>3</sup> )
Eucalyptus	8.771	0,50	5,5	0,021	0,067	1.600	107,2	940.251
Pin des montagnes	902	0,45	5	0,015	0,044	1.600	66,3	59.803
Jarca	2.876	0,45	5	0,013	0,040	1.300	48,2	138.623
Aliso	1.725	0,45	5	0,013	0,040	1.300	48,2	83.145
<b>TOTAL</b>	<b>14.376</b>							<b>1.169.168</b>

(1) Circonférence mesurée avec un ruban à 1,30 m de la base pour des diamètres d'arbres de 15 cm à 20 cm effectivement commercialisés dans la région  
 (\*) Hauteur commercialisable

Soulignons que le diamètre commercialisable utilisé dans le tableau IV-36 ci-dessus est celui considéré comme approprié dans la région et n'est pas nécessairement le diamètre repris dans les normes du Ministère du Développement et Planification (1998).

#### IV-5.2.5.4 Valeur de la production

Le tableau IV-37 donne la valeur totale brute de la production sylvicole dans le cas du scénario de développement sylvo-pastoral..

**TABLEAU IV-37: valeur brute de la production totale par essence du scénario sylvo-pastoral – Bassin de la Tolomosa**

Essence	Superficie plantée (ha)	Prix (*) (USD/ml)	Prix (USD/arbre)	Valeur brute production	
				(USD/ha)	(USD)
Eucalyptus	8.771	1,95	10,7	17.160	150.510.360
Pin des montagnes	902	2,4	12	19.200	17.318.400
Jarca	2.876	2,9	14,5	18.850	54.212.600
Aliso	1.725	2,9	14,5	18.850	32.516.250
<b>TOTAL</b>	<b>14.376</b>				<b>254.557.610</b>

(\*) Source du prix par mètre linéaire de l'arbre: communication personnelle de la scierie Aparicio (German Mendoza), Tarija; scierie Vilte (Gonzalo Vilte), Tarija (mars 2007)

La valeur brute commercialisable de la production forestière du bassin versant de la Tolomosa dans le cas du scénario sylvo-pastoral s'élève à 254,5 millions USD après un période de 30 ans, en considérant une période de 15 ans pour la plantation des 14.356 hectares avec une moyenne annuelle de 958 hectares et une période suivante de 15 ans pour la vente progressive du bois. Soulignons que cette valeur ne comprend pas celle de biens dérivés comme la chasse par exemple.

## IV-6 BILAN EN EAU ET VALORISATION

Le scénario sylvo-pastoral envisagé pour le développement du bassin versant affecte la quantité, la qualité et la distribution de l'eau au sein du bassin. Les termes du bilan en eau du scénario sylvo-pastoral sont estimés via la modélisation HRUFOR. Rappelons que, par manque de données, la qualité de l'eau est étudiée seulement à travers le rendement en sédiment dans le bassin.

### IV-6.1 DISCRETISATION SPATIALE

Lors de l'application du scénario sylvo-pastoral, l'interface AvSWAT produit une nouvelle carte d'occupation des terres. Le tableau IV-38 compare les HRU définies pour la situation actuelle par la modélisation TOLOHRU et celles définies via la modélisation HRUFOR. Soulignons que le changement de l'occupation des terres affecte la distribution des HRU, mais pas la délimitation des sous-bassins. Aussi, l'effet de ce changement est évalué en comparant les résultats au niveau des sous-bassins.

Parmi les quatre essences considérées pour le scénario, l'eucalyptus représente 61% de la couverture forestière (confer tableau IV-35). Aussi, nous avons retenu l'unité de couverture végétale FRST proposée par SWAT, dont les caractéristiques se rapprochent le mieux des conditions du bassin versant dans le cas du scénario sylvo-pastoral.

**TABLEAU IV-38: surfaces des HRU définies par les modélisations TOLOHRU et HRUFOR – Bassin de la Tolomosa**

Sous-bassin	TOLOHRU			HRUFOR		
	HRU	Surface HRU		HRU	Surface HRU	
		(ha)	(% dans sous-bassin)		(ha)	(% dans sous-bassin)
Tolomosa A	WPAS/JDER(2)	2.766	21	WPAS/JDER(2)	1.990	15
	WPAS/LEDK	4.059	31	WPAS/LEDK	3.420	26
	AGRC/JDER(2)	6.179	48	FRST/JDER(2)	7.600	58
Mena	PAST/LEDB(3)	2.716	42	PAST/LEDB(3)	1.250	19
	WPAS/JCHX	1.721	27	PAST/LEDB	634	10
	WPAS/LEDK	1.980	31	PAST/LEDK	527	8
				FRST/JCHX	1.760	27
			FRST/JDER(2)	2.240	35	
Sola	PAST/IGFA	14.302	100	PAST/IGFA	14.302	100
Pinos	PAST/LEDB(2)	8.182	100	PAST/LEDB(2)	4.930	60
				FRST/JDER(4)	3.260	40

Le tableau IV-38 ci-dessus montre que de nouvelles HRU sont apparues dans le bassin avec une occupation sylvicole des terres.

Les surfaces des HRU avec une occupation sylvicole des terres (FRST) occupent une superficie de 14.860 hectares dans le bassin versant, c'est-à-dire pratiquement égale à l'ensemble des terres de classe I et II considérées comme aptes à la production sylvicole (confer tableau IV-5).

#### IV-6.2 PHASE DE CALIBRAGE

Pour pouvoir comparer la situation actuelle caractérisée via la modélisation TOLOHRU avec celles du scénario HRUFOR, aucun paramètre de la modélisation du scénario n'a été calibré. Cependant, pour chaque HRU à couverture forestière, seul le paramètre CANMX a été modifié en passant de la valeur 2 à 5 pour mieux tenir compte de la canopée plus importante d'une forêt. Comme pour les autres modélisations, le CN, avant d'être introduit dans la modélisation, a été transformé par nos soins en fonction de la pente moyenne du sous-bassin.

Soulignons que les données sont très limitées quant aux conséquences du développement d'un scénario sylvo-pastoral sur les paramètres biophysiques du bassin. Par exemple, on peut imaginer que la conversion d'une terre à un usage pastoral signifie un compactage du sol qui devient moins perméable. Cette conséquence peut affecter certains paramètres lors de la modélisation. Cependant, le manque de données ne permet pas de tenir compte d'un tel phénomène.

#### IV-6.3 ANALYSE HYDROLOGIQUE DES RESULTATS

Les figures IV-14 à IV-16 comparent les débits journaliers ( $Q_{\text{tolohru}}$  et  $Q_{\text{hrufor}}$ ) des hydrogrammes simulés sur la période de 1977 à 1984. L'hydrogramme des débits observés ( $Q_{\text{obs}}$ ) est donné à titre indicatif. L'échelle de l'ordonnée des figures IV-15 et IV-16 est logarithmique pour mieux percevoir la différence entre les hydrogrammes pour les débits faibles.

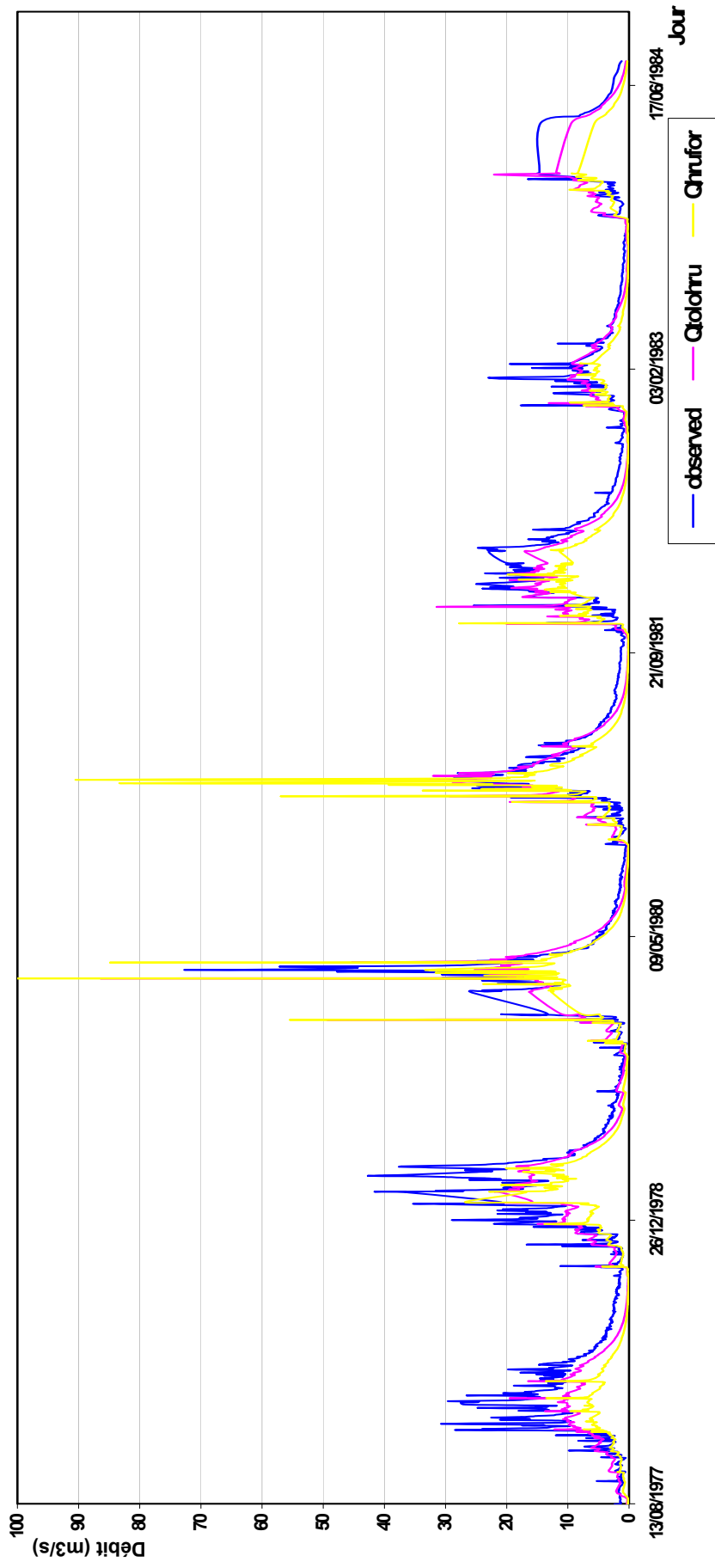
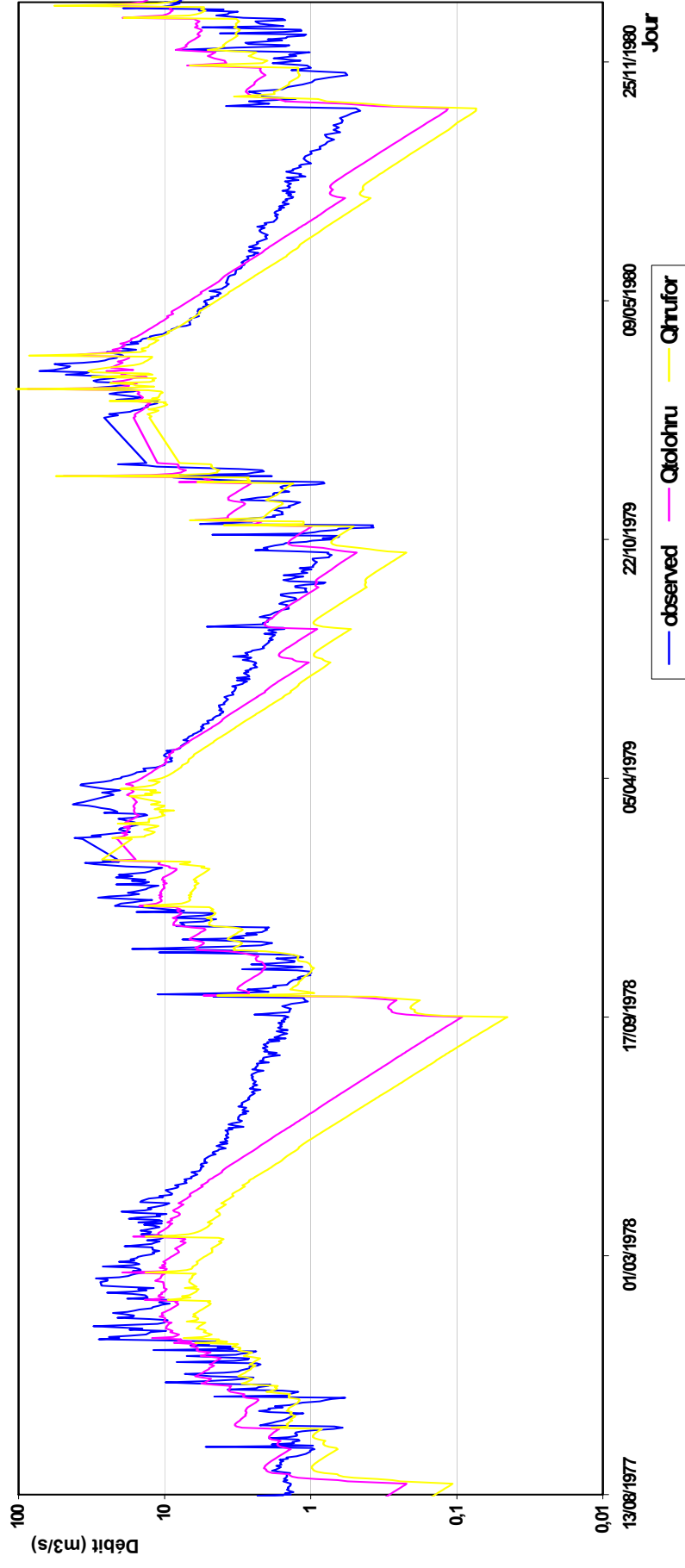


FIGURE IV-14: comparaison entre les hydrogrammes des débits journaliers simulés de la situation actuelle ( $Q_{to10hr}$ ) et de la situation avec scénario ( $Q_{hrfor}$ ) sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa



**FIGURE IV-15:** comparaison sous forme logarithmique entre les hydrogrammes des débits journaliers simulés de la situation actuelle ( $Q_{tolohru}$ ) et de la situation avec scénario ( $Q_{trufor}$ ) sur la période de 1977 à 1984 (première partie) – Bassin de la Tolomosa

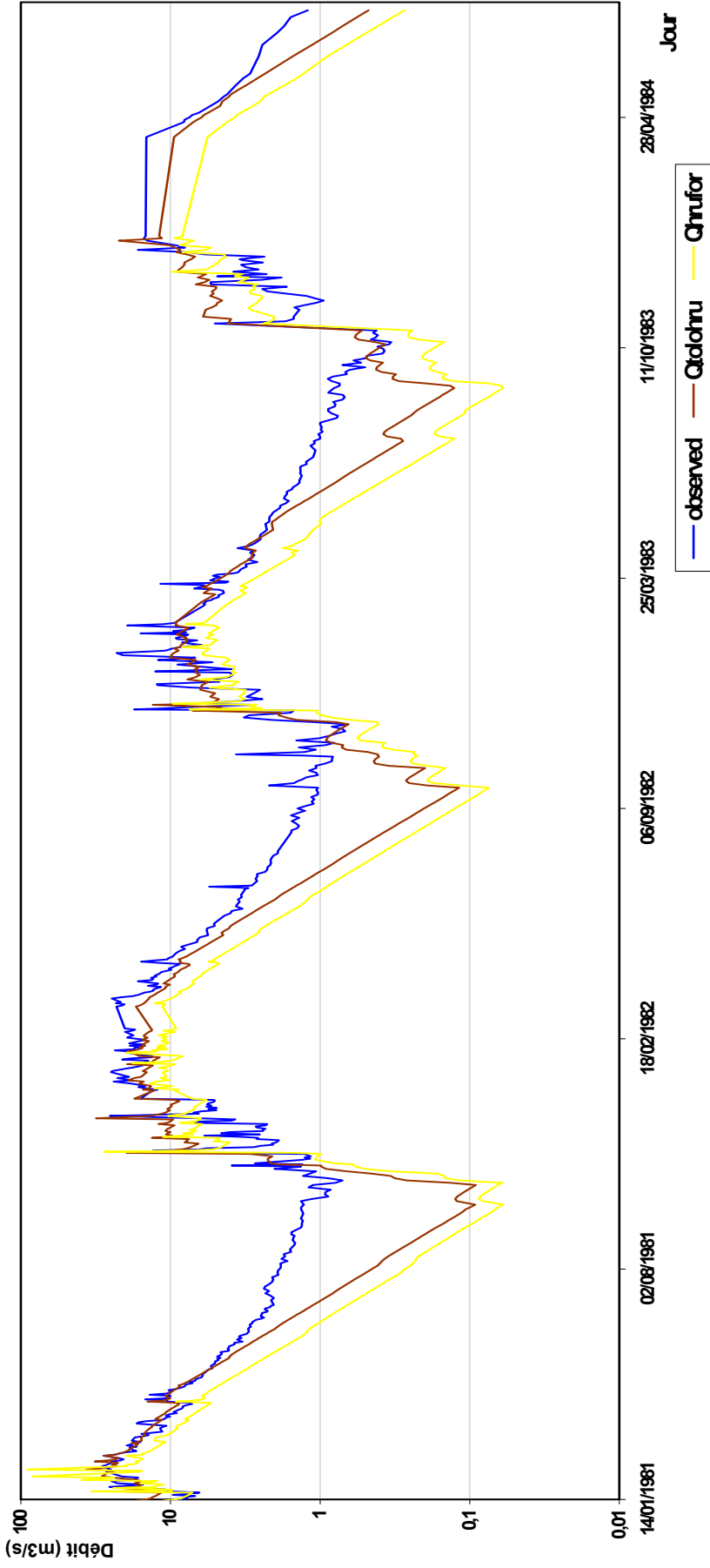


FIGURE IV-16: comparaison sous forme logarithmique entre les hydrogrammes des débits journaliers simulés de la situation actuelle ( $Q_{t(olohru)}$ ) et de la situation avec scénario ( $Q_{hrufor}$ ) sur la période de 1977 à 1984 (deuxième partie) – Bassin de la Tolomosa

On constate une allure générale semblable entre les deux hydrogrammes simulés, y compris durant la période de récession des saisons sèches, avec une atténuation de l'amplitude des débits simulés via HRUFOR par rapport à ceux obtenus via TOLOHRU. On remarque aussi sur la période de 1980 à 1981 certains pics de débits modélisés par HRUFOR difficilement explicables.

#### IV-6.3.1 BILAN HYDROLOGIQUE

Le tableau IV-39 présente pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs annuelles moyennes des termes du bilan en eau simulés par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

**TABLEAU IV-39: résultats des termes du bilan en eau annuels moyens de la modélisation HRUFOR sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Année hydrologique	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Ecoulement total (1) (mm)
<b>Moyenne annuelle</b>	1.214	874	307	30	30	337

Source: fichier TXTINOUT, output SBC  
(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

Le tableau IV-40 présente pour le bassin versant de la Tolomosa les valeurs mensuelles moyennes simulées des termes du bilan en eau simulés par année hydrologique sur la période de 1977 à 1984.

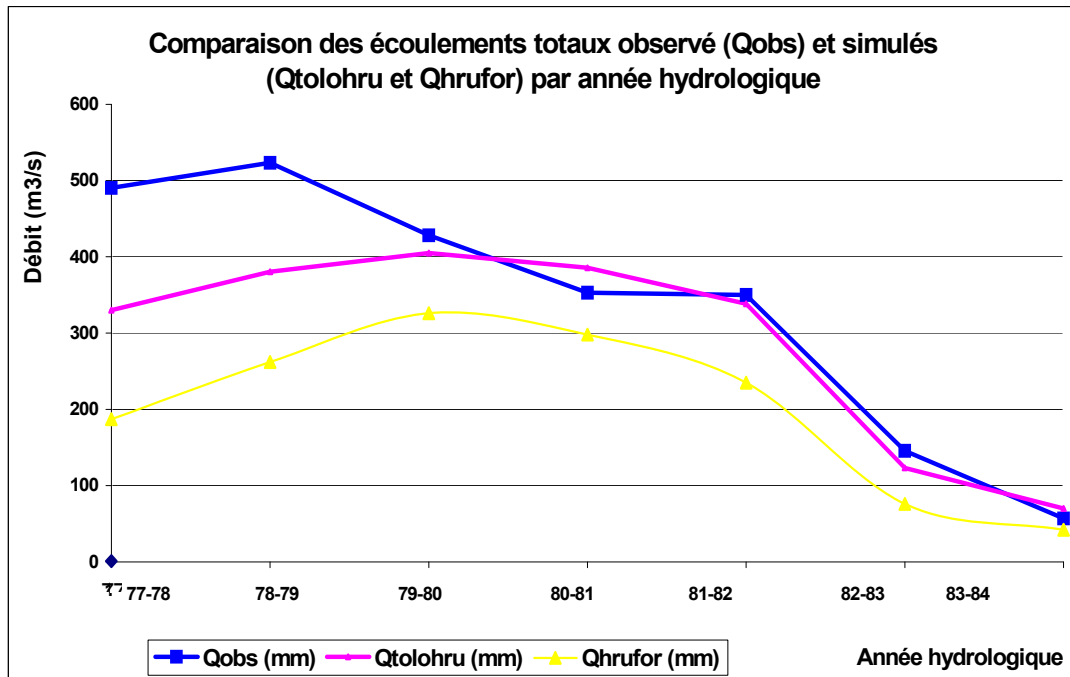
**TABLEAU IV-40: résultats des termes du bilan en eau mensuels moyens de la modélisation HRUFOR sur la période de 1977 à 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Mois	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Ecoulement total (1)(mm)
Août	15	10	2	0	0	2
Septembre	13	12	2	0	0	2
Octobre	64	35	4	0	0	4
Novembre	146	80	15	0	0	15
Décembre	213	122	34	1	2	35
Janvier	265	145	60	3	9	63
Février	233	155	78	9	11	87
Mars	190	170	60	8	8	68
Avril	62	99	29	5	0	34
Mai	7	33	14	2	0	16
Juin	1	7	6	1	0	7
Juillet	5	5	3	0	0	3
<b>TOTAL</b>	<b>1.214</b>	<b>874</b>	<b>306</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>337</b>

Source: fichier TXTINOUT, output SBC  
(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

#### IV-6.3.2 HYDROGRAMMES ANNUELS

Les sommes annuelles des écoulements totaux simulés sont données sur le graphique de la figure IV-17 par année hydrologique. L'année 76-77, rappelons-le, est l'année de mise en régime. Les écoulements totaux observés sont donnés à titre indicatif.



**FIGURE IV-17: comparaison des sommes annuelles des écoulements totaux simulés aux dates correspondantes par année hydrologique des modélisations TOLOHRU et HRUFOR sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

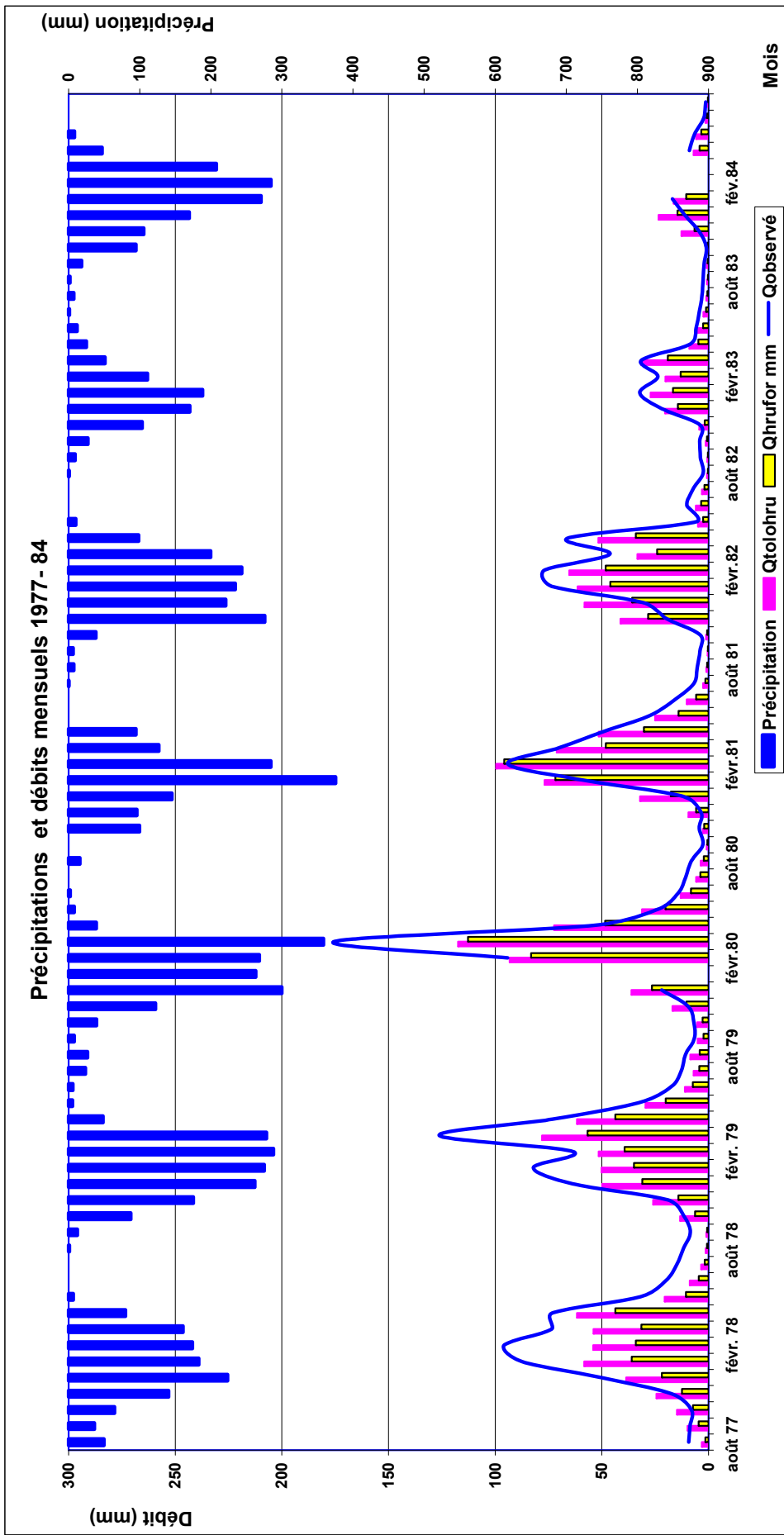
On constate un décalage entre l'hydrogramme obtenu via TOLOHRU et celui obtenu via HRUFOR. La tendance par contre est bien respectée entre les deux hydrogrammes simulés. Le changement de la végétation dans le bassin a une importance sur la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire.

#### IV-6.3.3 HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET HYDROGRAMMES D'ÉCOULEMENTS

La figure IV-18 compare les hydrogrammes partiels du total mensuel des débits simulés ( $Q_{tolohru}$  et  $Q_{hrufor}$ ) pour les mêmes dates avec l'histogramme des précipitations mensuelles. L'hydrogramme des débits disponibles ( $Q_{obs}$ ) est donné à titre indicatif.

#### IV-6.4 RENDEMENT EN SEDIMENT

Le rendement en sédiment annuel moyen simulé par la modélisation HRUFOR s'élève à 3,9 t/ha. Rappelons que le rendement annuel en sédiment observé à partir des bathymétries effectuées dans le réservoir de San Jacinto est de 14,5 t/ha/an (confer point II-4.5).



**FIGURE IV-18: évolution temporelle du total mensuel des débits simulés ( $Q_{hrufur}$  et  $Q_{tolohru}$ ) à l'exutoire pour les mêmes dates et des précipitations mensuelles correspondantes sur la période de 1977 à 1984- Bassin de la Tolomosa**

## IV-6.5 ALLOCATION ET VALORISATION DE L'EAU

La valorisation des ressources hydriques est envisagée dans le contexte du bassin versant considéré comme « une fabrique » qui produit un « bien » utilisable directement appelé « eau ». Vu l'ampleur des activités productives, dont l'eau est un intrant, l'approche se limite à analyser l'impact de la variation des termes du bilan en eau du bassin suite à l'application du scénario sylvo-pastoral sur les différentes activités productives principales considérées précédemment, la situation sans projet étant prise comme référence. La valeur attribuée au mètre cube d'eau est une valeur relative basée sur la différence de la production du bassin versant entre la situation sans scénario, dont les termes du bilan en eau sont estimés via TOLOHRU, et celle avec le scénario sylvo-pastoral, dont le bilan en eau est modélisé via HRUFOR.

Le tableau IV-41 compare l'allocation en eau, la valeur de la production agricole, pastorale, sylvicole et hydroélectrique du bassin entre la situation sans projet et le scénario sylvo-pastoral (valeurs actualisées). Le taux d'inflation cumulé annuel est de 2,98% et est calculé comme la moyenne des taux annuels de 2001 à 2007 (Banque nationale, novembre 2007).

**TABLEAU IV-41: comparaison de l'allocation de l'eau et de la valeur annuelle brute de la production du bassin entre la situation sans projet et le scénario sylvo-pastoral (valeurs actualisées) – Bassin de la Tolomosa**

Type de production	Situation sans projet (période de 30 ans)			Situation avec projet (période de 30 ans)		
	Surface (ha)	Production		Surface (ha)	Production	
		(USD)	(Hm <sup>3</sup> )		(USD)	(Hm <sup>3</sup> )
Agricole	2.694 (*)	41.707.777		2.694 (*)	41.707.777	
Pastorale	35.000	6.661.647		29.395	6.661.647	
Forestière	Négligeable	Négligeable		14.276	56.951.038	
Hydroélectrique	--	10.720.587			10.720.587	
Hydrique	Bassin versant	--	190,24	--	--	141,21
<b>TOTAL</b>		<b>59.090.011</b>			<b>74.333.272</b>	

(\*) On ne considère que les cultures irriguées sur les terres de classe II

Ce tableau IV-41 ci-dessus indique que, dans le cas de la situation sans projet telle que décrite précédemment, le bassin versant fournit 190,24 Hm<sup>3</sup> d'eau et contribue à une production principalement agro-pastorale et hydroélectrique d'une valeur brute annuelle moyenne de 59,1 millions USD. Dans le cas de la situation avec projet, le bassin fournit 141,21 Hm<sup>3</sup> d'eau avec une production annuelle brute sylvo-pastorale et hydroélectrique évaluée actuellement à 74,3 millions USD après une période de 30 ans. La différence de la valeur entre les situations avec et sans projet est de 15,2 millions USD.

Le tableau IV-42 donne l'écoulement total à l'exutoire du bassin versant obtenu via les modélisations TOLOHRU et HRUFOR en rapport avec la valeur de la production du bassin dans les deux situations envisagées (situation actuelle; scénario sylvo-pastoral).

**TABLEAU IV-42: écoulement total annuel moyen à l'exutoire et valeur annuelle brute de la production – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation du bilan en eau	Valeur annuelle brute production (10 <sup>6</sup> USD)	Ecoulement total (1)	
		(mm)	(m <sup>3</sup> ) (2)
Sans scénario via TOLOHRU	59,1	454	190.244.160
Avec scénario via HRUFOR	74,3	337	141.216.480

(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

(2) 10 m<sup>3</sup>/ha = 1 mm; 337 x 10 x 41.904

Dans le cas du scénario, on constate que la différence de 15,2 millions USD entre les valeurs brutes annuelles des productions sans projet et avec scénario correspond à une différence entre les écoulements totaux annuels à l'exutoire estimée à 49 Hm<sup>3</sup>. Cette quantité d'eau manquante est

supposée consommée dans le bassin versant pour répondre à la demande supplémentaire en eau du scénario sylvo-pastoral. Cette relation entre la variation de la valeur productive du bassin et celle de la quantité d'eau à l'exutoire permet d'obtenir la valeur unitaire relative du bien eau qui se chiffre à 0,31 USD par mètre cube en fonction des hypothèses et des conditions envisagées par cette étude.

## IV-6.6 DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

### IV-6.6.1 PARAMETRE CN

Les tableaux IV-43 à IV-45 comparent entre les trois sous-bassins de TolomosaA, de Mena et de Pinos les valeurs du paramètre CN par HRU calculées via les modélisations TOLOHRU et HRUFOR.

**TABLEAU IV-43: comparaison des valeurs du paramètre CN entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU du sous-bassin TolomosaA – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	CN <sub>2S</sub> SWAT (TolomosaA)			
	WPAS/ JDER(2)	WPAS/ LEDK	AGRC/ JDER(2)	FRST/ JDER(2)
TOLOHRU	82	73	84	
HRUFOR	82	73		84

**TABLEAU IV-44: comparaison des valeurs du paramètre CN entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU du sous-bassin Mena – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	CN <sub>2S</sub> SWAT (Mena)						
	PAST/ LEDB(3)	WPAS/ JCHX	WPAS/ LEDK	PAST/ LEDB	FRST/ JCHX	PAST/ LEDK	FRST/ JDER(2)
TOLOHRU	73	73	73				
HRUFOR				73	70	73	73

**TABLEAU IV-45: comparaison des valeurs du paramètre CN entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU des sous-bassins Sola et Pinos – Bassin de la Tolomosa**

Modélisation	CN <sub>2S</sub> SWAT (Sola)	CN <sub>2S</sub> SWAT (Pinos)	
	PAST/ IGFA	PAST/ LEDB(2)	FRST/ JDER(4)
TOLOHRU	74	74	
HRUFOR	74	74	70

La comparaison des valeurs des CN calculées par SWAT et ajustées à la pente par nos soins montre peu de variation entre les modélisations du bilan en eau de la situation actuelle et celle du scénario sylvo-pastoral. La sensibilité à la partition entre infiltration de surface et ruissellement de surface représentée par le CN est donc assez faible.

### IV-6.6.2 TERMES DU BILAN EN EAU

L'application du scénario sylvo-pastoral a un impact physique sur le bilan en eau modélisé via HRUFOR et influence l'allocation et la disponibilité en eau pour d'autres activités et usages tels que l'agriculture, l'hydroélectricité ou même le tourisme et la vie sylvestre. On considère que les changements subis par les termes du bilan en eau influencent directement ou indirectement les activités économiques productives du bassin versant.

Le tableau IV-46 compare les valeurs annuelles moyennes des termes du bilan en eau simulés par les modélisations HRUFOR et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984.

**TABLEAU IV-46: comparaison des valeurs annuelles moyennes des termes du bilan en eau entre les modélisations HRUFOR et TOLOHRU sur la période de 1977 à 1984 – Bassin de la Tolomosa**

Moyenne annuelle	Précipitation (mm)	ETR (mm)	SURF_Q + LAT_Q (mm)	GW_Q (mm)	Recharge (mm)	Ecoulement total (1)	
						(mm)	(Hm <sup>3</sup> ) (2)
<b>TOLOHRU</b>	1.214	756	446	8	8	454	190,24
<b>HRUFOR</b>	1.214	874	307	30	30	337	141,21

Source: fichier TXTINOUT, ouput SBC

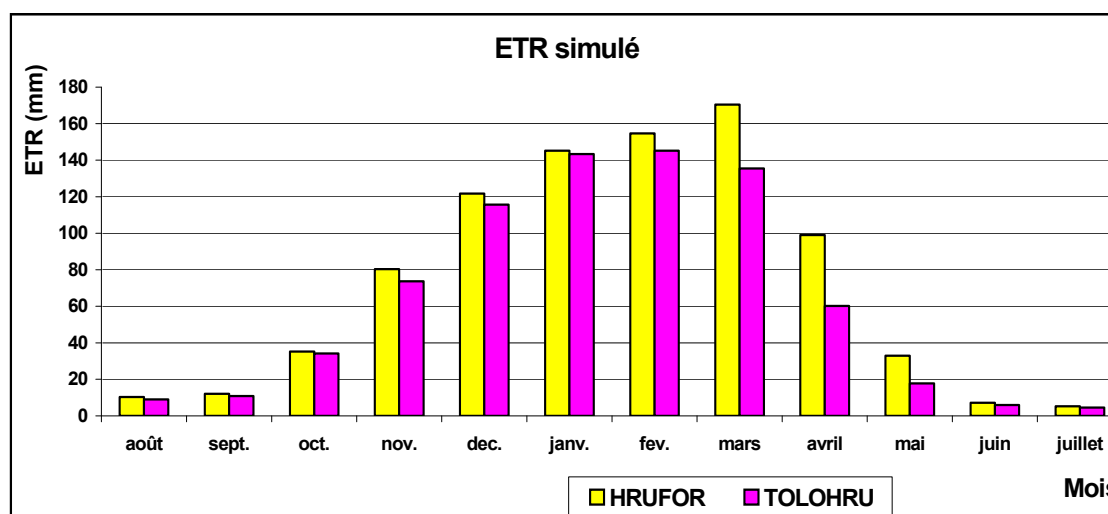
(1) SURF\_Q + LAT\_Q + GW\_Q

(2) 10 m<sup>3</sup>/ha = 1 mm; 337 x 10 x 41.904

On constate que la modification spatiale de l'occupation des terres avec l'introduction de grandes zones boisées et le changement de la structure végétale, particulièrement d'une végétation basse à haute comme la forêt, ont un impact important sur la répartition de l'écoulement et la quantité qui atteint l'exutoire.

L'amélioration des processus d'infiltration affecte la recharge de la nappe superficielle et le débit de base GW\_Q qui passe de 8 mm à 30 mm, correspondant à une variation de 375%.

Puisque les valeurs des CN montrent peu de variations entre la situation sans projet modélisée via TOLOHRU et celle du scénario sylvo-pastoral via HRUFOR, la diminution de l'écoulement total à l'exutoire serait plutôt due à l'augmentation marquée de l'ETR par rapport à TOLOHRU (16%) provoquée entre autres par une canopée plus importante interceptant mieux les précipitations. La comparaison entre les valeurs d'ETR simulées via TOLOHRU et HRUFOR est donnée sur le graphique de la figure IV-19.



**FIGURE IV-19: comparaison d'ETR mensuelle moyenne simulée entre les modélisations TOLOHRU et HRUFOR**

Les résultats du tableau IV-46 ci-dessus indiquent aussi que l'apport annuel moyen en eau dans le réservoir considéré comme l'exutoire du bassin versant est de 141 Hm<sup>3</sup>, une fois le boisement des 14.376 hectares conclu pendant l'année 15<sup>1</sup>, qui correspond à une diminution annuelle de 49 Hm<sup>3</sup> d'eau par rapport à la situation sans projet. Le volume utile annuel moyen passe alors de 368 Hm<sup>3</sup> à 319 Hm<sup>3</sup> pendant l'année 15 (confer tableau IV-9). Cette diminution annuelle de 49 Hm<sup>3</sup> à partir de la

<sup>1</sup> On considère l'année 1 comme la première année de la mise en œuvre du scénario

quinzième année correspond à une perte moyenne journalière de 2,1 cm de hauteur d'eau dans le réservoir<sup>1</sup>.

Ces conclusions sont confirmées par la littérature pertinente qui traite de l'influence de la reforestation sur les termes du bilan en eau et de l'érosion dans un bassin versant (Calder, 2002; Aylward, 2002; Bruijnzeel, 2001; Bosch, 1982). Les résultats montrent que l'évapotranspiration annuelle de la forêt est normalement plus importante que pour des couvertures végétales basses et conduit à une diminution du ruissellement. De plus, l'augmentation de l'infiltration favorise la recharge de la nappe phréatique. En particulier, Bosch et al. (1982) ont montré que les forêts de conifères et d'eucalyptus ont les effets les plus importants sur les écoulements. Elliot et al. (1996) cités par Tripathi et al. (2006) rapportent que l'évapotranspiration simulée par le modèle SWAT augmente avec le degré de discrétisation spatiale du sous-bassin.

Alors que, toujours selon ces études, il est possible de tirer des conclusions de l'impact de la forêt sur l'écoulement annuel, il est par contre plus difficile d'en tirer pour l'écoulement saisonnier. En effet, l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol ne conduit pas nécessairement à une augmentation des écoulements durant la saison sèche, ce que nous avons aussi constaté en examinant l'évolution temporelle des graphiques des débits journaliers disponibles et simulés à l'exutoire (confer figures IV-14, IV-15 et IV-16).

#### **IV-6.6.3 RENDEMENT EN SEDIMENT**

On admet communément que le taux d'infiltration plus important sous un couvert forestier réduit le ruissellement et le transport des sédiments. Le développement racinaire des arbres améliore la stabilité du sol et réduit l'érosion. Par contre, l'exploitation forestière exige un minimum d'infrastructure telle qu'un réseau routier qui peut créer des effondrements de sols ou des ravines. Enfin, l'élevage extensif, qui reste une activité considérée par ce scénario, provoque la compaction du sol qui favorise l'érosion. La littérature récente précitée qui traite de l'influence de la reforestation sur les termes du bilan en eau et de l'érosion conclut que l'effet de la reforestation sur l'érosion dans un bassin versant peut être positif ou négatif suite aux résultats de processus souvent contradictoires et aux types d'essences employés (taille des feuilles; différences entre conifères et feuillus sur les sols, etc.).

Le taux actuel de sédimentation du réservoir calculé par les bathymétries est de 13,3 m<sup>3</sup>/ha/an et représente une sédimentation annuelle moyenne de 557.755 m<sup>3</sup> dans le réservoir (confer tableau II-21). La quantité des sédiments accumulés dans le réservoir sur les quinze années supplémentaires sans scénario est alors de 8.359.848 mètres cubes<sup>2</sup>. La quantité totale des sédiments à la quinzième année sera alors de 16,7 Hm<sup>3</sup> (8,4 Hm<sup>3</sup> à l'année quinze qui s'ajoutent aux 8,3 Hm<sup>3</sup> présents).

Le scénario sylvo-pastoral, après la période de temps de quinze ans, ramène le rendement en sédiment à 3,5 m<sup>3</sup>/ha (3,9 t/ha). Faute de mieux, on considère une diminution linéaire du rendement en sédiment du bassin qui correspond à une moyenne annuelle de 8,3 m<sup>3</sup>/ha (8,9 t/ha). La quantité des sédiments accumulés dans le réservoir sur les quinze années de mise en œuvre du scénario sera de 5.2 Hm<sup>3</sup> environ. La quantité totale accumulée dans le réservoir sera alors de 13,5 Hm<sup>3</sup> (5,2 + 8,3 millions de m<sup>3</sup>). Sur les quinze années suivantes, le rendement en sédiment n'est plus que de 3,5 m<sup>3</sup>/ha, qui correspond à 2,1 Hm<sup>3</sup> accumulés dans le réservoir<sup>3</sup>. Le tableau IV-47 compare les volumes des sédiments dans le réservoir calculés sur base des résultats des bathymétries et de la modélisation HRUFOR sur une période de quinze ans et trente ans.

---

<sup>1</sup> 49 Hm<sup>3</sup> sur 649 ha (superficie moyenne du réservoir); 10 m<sup>3</sup>/ha correspondent à 1 mm; donc 75.500 m<sup>3</sup>/ha sur 365 jours correspondent à 20,9 mm/jour

<sup>2</sup> 15 ans x 13,3 m<sup>3</sup>/ha x 41.904 ha

<sup>3</sup> 15 ans x 3,5 m<sup>3</sup>/ha x 41.904 ha

**TABLEAU IV-47: comparaison entre les volumes des sédiments dans le réservoir calculés par les bathymétries et simulés par la modélisation HRUFOR – Bassin de la Tolomosa**

Année	Situation sans projet		Situation avec scénario	
	Volume total d'eau dans le réservoir (1) (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Sédiment accumulé dans le réservoir (*) (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume total d'eau dans le réservoir (1) (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Sédiment accumulé dans le réservoir (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
1989	58,0		58,0	
2004	49,7 (*)	8,3	49,7	8,3
2019	41,3	16,7	44,5	13,5
2034	32,9	25,1	42,4	15,6

(1) Altitude du déversoir à 1.884 m

(\*) Calculé sur base des résultats des bathymétries (confer tableau II-21)

Soulignons aussi que la diminution du taux annuel de sédiment offre d'autres bénéfices tels que l'amélioration de la qualité de l'eau.

#### IV-6.6.4 EAU POTABLE

Si une consommation moyenne de 50 l/jour d'eau potable est envisagée par habitant du bassin versant (norme bolivienne 89; Institut bolivien de normalisation et qualité), la consommation journalière en eau potable s'élève alors à 368.800 l/jour avec 7.736 habitants (confer tableau IV-10) et représente un volume annuel de 139.248 m<sup>3</sup>. Ce volume d'eau est considéré comme négligeable par rapport à l'écoulement total annuel à l'exutoire pour le calcul de l'allocation de l'eau dans le bassin.

#### IV-6.6.5 PRODUCTION HYDROELECTRIQUE

L'examen de la cote annuelle moyenne de la surface de l'eau du réservoir sur le graphique de la figure IV-9 montre que, malgré la diminution journalière du volume utile dans le réservoir correspondant à une hauteur moyenne de 2,1 cm, le niveau de la surface de l'eau se maintient pratiquement toujours au-dessus de la cote de 1871,7 m. Cette constatation suggère que la diminution du volume utile d'eau dans le réservoir n'affectera pas de manière significative la production hydroélectrique du PMSJ. La différence éventuelle du revenu annuel brut fourni par la vente d'électricité entre la situation sans projet et le scénario est alors négligeable, sauf dans le cas d'une amélioration du prix de vente du kWh considérée comme improbable pour les raisons évoquées précédemment.

#### IV-6.6.6 VALORISATION HYDRIQUE

La valorisation des ressources hydriques du bassin versant est fondamentalement liée à la soutenabilité du développement productif définie par la Commission mondiale de l'environnement et du développement (1987) comme « la rencontre des besoins du présent sans compromettre les possibilités des générations futures de rencontrer leurs propres besoins ».

En pratique, les nombreuses fonctions liées aux ressources en eau ainsi que leurs relations et leurs agrégations rendent l'évaluation complète d'une unité hydrique comme une tâche pharaonique. De plus, la possibilité d'employer l'eau à plusieurs fins ou simultanément pour différents usages signifie que la concurrence et la complémentarité sont des considérations importantes dans l'allocation et la valorisation des ressources en eau.

Pour mener à bien la valorisation de l'eau, il a été nécessaire de prendre en considération un certain nombre d'hypothèses restrictives. Tout d'abord, il existe différentes manières de calculer sa valeur économique qui peut être dérivée de son utilisation et/ou de son existence. De plus, cette utilisation de l'eau peut être directe (valeur de consommation) ou indirecte et considérée par exemple comme un service hydrologique qui contrôle les inondations ou le transport de nutriments. On a envisagé ici la valeur de l'eau uniquement comme une valeur de consommation directe, sans tenir compte de sa valeur indirecte écologique ou d'existence ni des externalités économiques éventuelles hors du bassin considéré<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> L'externalité est tout ce qui impose un coût sur des usagers en aval, dû à des actions non optima dans le bassin versant considéré

Cette valorisation de l'eau ne correspond pas à une valeur unitaire absolue puisque toutes les activités productives du bassin n'ont pas été comptabilisées dans l'étude de la production, mais indique plutôt une valeur relative en fonction de deux situations envisagées et décrites pour le bassin.

Enfin, nous admettons la faisabilité théorique sur le terrain du scénario extrême choisi pour évaluer les ressources et la valeur de l'eau avec une couverture forestière idéalisée et sans tenir compte des conditions d'exploitation/débardage qui pourraient changer.

**CONCLUSIONS,  
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES**



## CONCLUSIONS

Les résultats de la modélisation du cycle de l'eau du bassin versant de la Tolomosa obtenu en utilisant le modèle hydrologique semi-distribué SWAT indiquent que ce dernier est un outil efficace pour évaluer les termes du bilan en eau du bassin. En effet, les hydrogrammes obtenus exprimant les tendances des débits journaliers, mensuels et annuels sur les périodes de calibrage et validation reflètent bien ceux provenant des débits observés. De plus, les critères statistiques utilisés pour évaluer les performances du modèle ont des valeurs considérées comme acceptables par la littérature pertinente et permettent de considérer le modèle comme capable de simuler le bilan en eau journalier, mensuel et annuel du bassin versant.

Cependant, il est important de souligner que l'utilisation d'un modèle semi-distribué tel que SWAT exige une bonne connaissance du bassin versant et un grand nombre de données biophysiques disponibles en sachant que chaque unité des sols et d'occupation des terres absorbe différentes quantités d'eau de précipitation et affecte la lame d'eau atteignant la rivière et le réservoir de San Jacinto. Aussi, une part considérable de cette recherche a été consacrée à l'amélioration des connaissances du milieu biophysique du bassin grâce, entre autres, à de nombreuses observations de terrain.

Une spatialisation plus fine et plus réaliste des données biophysiques du bassin versant en unités élémentaires de calcul aurait pu être envisagée, mais ne semblait pas prioritaire pour améliorer les performances du modèle, tenant compte du coût temporel et financier d'un tel découpage. Nous estimons en effet que les performances obtenues reflètent suffisamment bien le comportement hydrologique du bassin versant où l'analyse du fonctionnement hydrologique se fait plutôt à l'échelle mensuelle, annuelle et interannuelle.

Les valeurs simulées des différents rendements en sédiment sont assez dispersées. Les apports en sédiment du bassin versant n'ont pu être estimés que globalement, sans clairement pouvoir expliquer certains résultats extrêmes, ou définir les zones géographiques spécifiques de production et les attribuer à des changements des pratiques dans l'utilisation des terres ou à des phénomènes naturels. Le modèle de Wischmeier (1978), développé de manière empirique à partir de nombreuses données de parcelles cultivées aux Etats-Unis, présente certaines limites à son applicabilité dans des conditions différentes de celles où il a été élaboré. Outre le fait que le modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et que les quantités de pertes estimées n'incluent pas les pertes par d'autres types d'érosion (linéaire, solifluxion, etc.), le modèle est basé sur la moyenne annuelle à long terme des précipitations, lesquelles valeurs ne reflètent pas nécessairement des précipitations isolées très intenses qui peuvent causer une importante érosion du sol. Le facteur topographique LS dépend d'un exposant (appelé  $m$ ) fonction de plusieurs paramètres, dont la pente. Tenant aussi compte que pratiquement la moitié du bassin versant possède des pentes très escarpées, l'utilisation de l'USLE se trouverait dans des conditions autres que celles où elle a été élaborée. Enfin, l'impact humain et animal sur la charge sédimentaire qui peut être considérable, même dans des zones aux conditions géologiques stables, n'a pas non plus fait l'objet d'une étude plus approfondie par manque de données disponibles. De plus, selon Nearing (1994), l'application de l'équation de Wischmeier à d'autres sites semble délicate pour faute de validation et souvent contestée quant à la validité de ses résultats (Nearing et al., 1994).

Du point de vue du bilan en eau, l'étude montre que le changement proposé dans l'occupation des terres (scénario) a un impact sur la disponibilité globale en eau du bassin versant, qui se reflète par la diminution de la lame d'eau totale annuelle atteignant le réservoir de San Jacinto, par la variation de l'importance relative des composantes de l'écoulement total et, dans une moindre mesure, sur la répartition saisonnière des débits ainsi que sur la sédimentation du réservoir. On constate par ailleurs que cet impact sur l'écoulement global dépend aussi de l'aptitude du sol à retenir l'eau (capacité d'infiltration), du régime hydrologique de la couverture végétale en termes d'évapotranspiration (ET) et de la capacité de la couverture végétale d'intercepter l'humidité. Soulignons enfin que le changement de l'occupation des terres n'est pas considéré dans la modélisation comme un processus dynamique qui peut affecter par exemple des microclimats présents dans le bassin.

Compte tenu des données incomplètes ou manquantes à tous les niveaux, les résultats des différentes modélisations doivent être considérés avec certaines réserves. Dans ce contexte, nous avons cherché non seulement à reproduire au mieux l'hydrogramme des débits simulés par rapport à

ceux observés, mais, surtout, à reproduire de la façon la plus réaliste possible les différentes composantes de l'écoulement total du bassin. Cette démarche justifie d'ailleurs le choix d'un modèle semi-distribué et déterministe plutôt que d'un modèle stochastique et/ou global. Aussi, dans cette thèse, nous insistons sur la similitude mensuelle et annuelle entre les dynamiques simulées et mesurées du fonctionnement hydrologique, les volumes mensuels et annuels simulés étant bien corrélés aux volumes observés, et non sur la proximité des valeurs absolues.

L'estimation de la valeur relative unitaire du bien environnemental «eau» ( $0,31 \text{ USD/m}^3$ ) a été obtenue en comparant la variation du bilan hydrique du bassin versant entre la situation sans projet et le scénario sylvo-pastoral avec la production annuelle sylvo-pastorale, agricole et hydroélectrique estimée sur une période de trente ans. Cette valorisation de l'eau ne correspond évidemment pas à une valeur absolue du mètre cube d'eau puisque toutes les activités productives du bassin n'ont pas été comptabilisées, mais indique plutôt une valeur relative en fonction de deux situations envisagées pour le développement du bassin versant de la Tolomosa. Nous sommes conscients que, pour évaluer les ressources hydriques et la valeur de l'eau, l'approche théorique suivie a conduit au choix de ce scénario avec une couverture forestière idéalisée et sans vraiment tenir compte de sa faisabilité sur le terrain et des conditions d'exploitation/débardage qui pourraient changer. Enfin, ce choix ne prend pas en compte la durabilité sociale et de l'impact engendrés par l'application du scénario qui doit être considéré comme un scénario de base permettant la modélisation hydrologique et la monétarisation du bien « eau ».

Il est finalement difficile de formuler des conclusions valables globalement sur les impacts possibles des différentes occupations des terres envisagées, tant sur le régime hydrologique (disponibilité en eau) que sur la gestion de l'eau et son impact social. En effet, celles-ci dépendent d'une multitude de facteurs naturels et socio-économiques qui ne sont pas toujours bien connus ou perçus. Le critère principal conduisant à un changement d'occupation des terres provient ici de raisons économiques, négligeant d'autres aspects tels que l'impact social, l'acceptation d'un nouveau système de production, la tradition ou l'écologie. Remplacer les terres agricoles d'aptitude moyenne par la sylviculture en reléguant l'agriculture sur des terres marginales peut être difficilement applicable, tenant aussi compte du revenu annuel important généré par l'agriculture dans le bassin versant. De plus, il est plausible qu'un exploitant ne se conduise pas toujours comme un être rationnel cherchant à maximiser son profit. L'étude considère également que les changements d'occupation des terres peuvent se faire de manière arbitraire, sans tenir compte d'un cadre législatif quelconque, d'incitants économiques ou d'une politique de développement au niveau régional et national. Enfin, par manque de données et de moyens, il n'a pas été possible d'examiner le volet social et la durabilité des propositions de développement envisagées par cette thèse (par exemple modalité de reconversion de la main-d'œuvre locale qui ne serait pas reprise par les activités sylvicoles). Aussi, le scénario de développement proposé dans cette thèse doit, rappelons-le, plutôt être considéré comme un scénario de base permettant d'examiner la problématique de la modélisation, l'allocation et la valorisation de l'eau et l'application de la méthodologie de cette thèse.

Enfin, les analyses et les résultats obtenus dans cette thèse doivent être interprétés avec prudence et considérés plutôt comme un moyen pratique d'exprimer la valorisation de l'eau à partir de l'évaluation des termes du bilan en eau de la Tolomosa et des effets d'un changement de l'occupation des terres sur ce bilan dans le cadre de la production économique du bassin versant. Finalement, cette étude suggère aussi implicitement qu'il n'y a pas une seule solution optimale, mais plutôt différents facteurs qui contribuent à la solution et dont le poids de chacun d'eux est fonction du niveau de perception et des connaissances disponibles.

## **RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES**

Les réponses à apporter aux différents problèmes qui se posent dans la gestion soutenable du bassin reflètent une combinaison entre les résultats obtenus des effets hydrologiques, économiques et sociaux. Mieux s'approcher de « l'arrangement optimum » dans le cas du bassin versant de la Tolomosa exige des recherches complémentaires durant les années à venir. La connaissance obtenue des composantes du cycle hydrique du bassin versant via les différentes modélisations devrait tout d'abord être affinée en considérant que certains paramètres liés aux caractéristiques biophysiques du bassin ont des valeurs très approximatives ou issues d'une agrégation de plusieurs variables. Des observations de terrain, spécifiques par sous-bassin, de certains paramètres tels que ceux liés aux types de sol et des nombreux microclimats présents amélioreront certainement les

performances du modèle. Pour améliorer la corrélation entre les données observées et simulées et améliorer la performance du modèle, il est nécessaire de disposer de séries de données complètes et de bonne qualité, principalement au niveau des séries de données débitométriques observées. Le développement d'un réseau de mesures débitométriques par sous-bassin permettra au modèle de fournir des résultats plus représentatifs de la réalité hydrologique de la Tolomosa. Il existe enfin d'autres facteurs qui affectent le bilan, mais qui n'ont pas encore pu être abordés et analysés explicitement dans cette thèse par manque de données. Nous pensons par exemple au tassement substantiel du sol par le déplacement du bétail qui provoque un changement local de la structure du sol et une variation de sa capacité d'infiltration; l'incidence de la présence supposée de forêts de brouillard qui peut intercepter davantage d'humidité que celle consommée par l'ET. Reste aussi à décider si et comment les zones boisées du bassin devraient être incluses dans cette typologie. Enfin, le changement de l'occupation des terres devrait être considéré comme un processus dynamique qui a des effets non seulement sur les propriétés du sol, mais aussi sur d'autres facteurs importants tels que ceux liés à la formation de microclimats.

Les apports en sédiment du bassin versant n'ont pu être estimés que très globalement avec des valeurs dispersées. L'érosion du sol est un problème sérieux pour la gestion du bassin versant. L'évaluation de l'érosion hydrique de sol pour différents scénarios d'utilisation du territoire est une clef importante pour définir des politiques de développement soutenables. Comme l'équation utilisée par le modèle SWAT ne semble pas s'appliquer convenablement au cas du bassin, des études complémentaires devraient être effectuées pour sélectionner et valider un modèle physiquement basé et approprié aux conditions géomorphologiques rencontrées pour l'étude de la production en sédiment du bassin versant. Soulignons cependant que l'équation de Wischmeier peut servir de fil conducteur conceptuel, car ce sont les mêmes facteurs qui, modulés différemment, interviennent dans la formation et l'érosion des sols.

Une étude exhaustive de la production du bassin versant pour arriver à la valorisation de l'eau en fonction des scénarios envisagés sortait du cadre et des moyens de cette étude. La valorisation de l'eau s'est limitée à donner un ordre de grandeur relatif en considérant seulement les bénéfices directs générés. Il serait intéressant de comparer et/ou corroborer les résultats de la valorisation du bien environnemental eau obtenus dans cette étude en utilisant d'autres techniques d'évaluation, par exemple celle du coût de remplacement (coût à supporter pour maintenir l'offre globale en développant de nouvelles sources) et en tenant compte des bénéfices indirects et de la valeur de non usage. Comme les ressources hydriques risquent d'être dangereusement insuffisantes pour satisfaire les besoins croissants de consommation des usagers situés à l'intérieur comme à l'extérieur du bassin (irrigation, eau potable et hydroénergie principalement), il serait aussi judicieux d'introduire dans l'analyse de la valeur de l'eau le coût du développement de ressources hydriques alternatives (eaux souterraines).

La production hydroélectrique dépend non seulement de la quantité d'eau disponible dans le réservoir, mais aussi du prix de vente de l'énergie qui est, rappelons-le, un prix artificiel répondant plus à des considérations politiques qu'économiques qui échappent à la compétence du PMSJ. Dans ces conditions, il est difficile de proposer un développement réaliste du bassin versant basé sur la production et la vente d'électricité. Cependant, il serait intéressant d'analyser les conditions favorables nécessaires pour pouvoir augmenter la production hydroélectrique du bassin versant, non seulement du point de vue du prix de vente de l'énergie, mais également de l'allocation de l'eau.

L'allocation et la gestion des ressources hydriques doivent être considérées d'un point de vue non seulement technique et économique, mais aussi social, sous forme d'un équilibre général. Nous avons proposé et quantifié dans la mesure des moyens disponibles une alternative théorique d'amélioration de la gestion des ressources hydriques sous forme d'une meilleure productivité. En plus d'avoir montré les implications du scénario sylvo-pastoral sur le bilan hydrique et la production dans le bassin, des réponses liées à l'applicabilité et l'impact social doivent encore être apportées et cela avec la participation accrue et décidée des communautés rurales et urbaines d'usagers. Le projet Contrat Rivière Tolomosa (CRT), mis récemment en place par l'Institut Interuniversitaire Bolivien des Ressources Hydriques grâce à l'appui de la Région wallonne sous forme d'un financement octroyé à travers la Commission mixte Région wallonne-Bolivie (juillet 2007), doit jouer un rôle moteur dans cette recherche. En effet, les axes prioritaires du CRT sont la sensibilisation et l'implication des acteurs du bassin versant (collectivités, organismes professionnels, associations, élus, usagers, etc.) dans les domaines de la gestion quantitative (étiage, inondation) et qualitative des eaux ainsi que

dans sa distribution équitable, et cela grâce à des actions de mobilisation et des procédures de concertation et de coordination. Le CRT, une fois la méthodologie et les résultats de cette étude mis à sa disposition, devra non seulement assurer que les compléments de recherche proposés répondent bien aux conditions et problèmes locaux (recherches ciblées), mais également concrétiser l'utilisation des résultats dans des activités qui permettent une gestion durable des ressources hydriques du bassin et, enfin, superviser la bonne réalisation des actions prévues. Par exemple, la mise en route du scénario sylvo-pastoral proposé exige l'établissement d'un calendrier précis permettant la désynchronisation spatiale (par sous-bassin ou zone productive) et temporelle (nombre d'hectares plantés par an) des activités pour permettre de mitiger et répartir les impacts hydrologiques et socio-économiques escomptés. Enfin, le CRT devra aussi veiller à ce que les retombées des avantages issus de la gestion améliorée des ressources hydriques se diffusent jusqu'à la zone de production et atteignent bien ceux qui en sont les responsables principaux, à savoir la population rurale du bassin. Remarquons enfin que, en règle générale, toutes les décisions politiques sont prises avec une vue à court terme alors que les études hydrologiques et la collecte de données se font sur une échelle de temps à long terme. La pérennité de l'institution CRT pourrait apporter une solution valable à ce problème.

En plus des résultats obtenus par ce travail, nous avons l'espoir que la démarche proposée dans cette thèse soit, dans un avenir proche, considérée par les décideurs et les bailleurs de fonds comme un outil de gestion disponible permettant de développer des mécanismes de coopération et de prise de décisions entre les utilisateurs de la ressource hydrique, de juger les intérêts économiques mis en jeu et de développer une politique de gestion rationnelle, soutenable et économiquement viable des ressources hydriques dans d'autres bassins versants dans le cadre des interventions du gouvernement national (Plan National de Gestion de Bassins Versants; Plan National de l'Irrigation et du Développement) ou préfectoral (Plan Départemental de Gestion des Ressources Naturelles), des institutions locales (y compris les ONG) et des usagers.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAPHIQUES

- AASANA, 1980. Estudio para el control de la erosión en el área del Aeropuerto Oriel Lea Plaza de Tarija Tomo I. Tarija, Bolivia.
- AGROSIG S.R.L., 2000. Estudio de la vegetación, uso actual de la tierra y riesgo a la erosión hídrica, en la parte alta de la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama. Protección del Medio Ambiente (PROMETA), Dirección de la RBCS. Tarija, Bolivia.
- AGROSIG S.R.L., 2001. Mapas temáticos para la parte baja de las cuencas de los ríos Tolomosa y La Victoria adyacentes con la reserva biológica de la cordillera de Sama zona 2. Protección del Medio Ambiente (PROMETA), Dirección de la RBCS. Tarija – Bolivia.
- Ahlfeld F., Branisa, L., 1960. Geología de Bolivia. Don Bosco, La Paz, Bolivia.
- Alzérreca H., Genin D., 1992. Los sistemas ganaderos de la zona andina: del concepto a una caracterización. IBTA-ORSTOM. La Paz, Bolivia.
- Alzérreca H., 1999. Evaluación de los campos naturales de pastoreo (CANAPAS) en la cuenca del valle central de Tarija. Programa Estratégico de Acción para la Cuenca Binacional del río Bermejo (PEA), Vol. V. Tarija, Bolivia.
- Alzérreca H., Ruiz, J., 1998. Geomorfología, suelos y clima, Valle Central de Tarija. Vol. III. Programa Estratégico de Acción para la cuenca Binacional del río Bermejo (PEA). Tarija, Bolivia.
- Alzérreca H., Ruiz J., 1999. Evaluación de tierras y propuesta de zonificación ganadera de la cuenca del Valle Central de Tarija. Programa Estratégico de Acción para la Cuenca Binacional del río Bermejo (PEA), Vol. VI. Tarija, Bolivia.
- Arnold J.G., Allen P.M., 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology* 176: 57 – 77.
- Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah S., Allen P., Williams R., 1998 Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1, model development. *J. Am. Water Resources Assoc.* 34: 73-89.
- Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah S., Allen P., 1999. Continental scale simulation of the hydrologic balance. *J. Am. Water Resources Assoc.* 35(5): 1037-51.
- Arnold J. G., Muttiah R., Srinivasan R., Allen P. M., 2000. Regional estimating of base flow and groundwater recharge in the Mississippi river basin." *J. Hydrol.* 227: 21-40.
- Attwood J., McCarl B., Chen C., Eddleman B., Nayda B., Srinivasan R., 2000. Assessing regional impacts of change: linking economic and environmental models. *Agric. Syst.* 63: 147-159.
- Aylward B., 2002. Land use, hydrological function and economic valuation. Proceedings of UNESCO symposium/workshop on Forest-Water-People in the Humid Tropics held in August 2000. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Barzev R., 2002. Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales editor. Serie técnica N° 4. Corredor Biológico Mesoamericano, CCAD. Managua, Nicaragua.
- Bechtel, 2002. Perspective on the Aguas del Tunari Water Concession in Cochabamba, Bolivia. PDF document; [www.betchel.com/pdf/cochabamba\\_facts.pdf](http://www.betchel.com/pdf/cochabamba_facts.pdf) (consulté en juin 2004).
- Beck S., 1988. Las regiones ecológicas y las unidades fitogeográficas de Bolivia. Manual de ecología. Instituto de Ecología, UMSA. La Paz, Bolivia.
- Beck S., Paniagua Zambrana N., Yevara Garate M., 1999. Flora y vegetación en la región central del departamento de Tarija, Bolivia. Ambiente y Sociedad en Los Andes; Políticas y Estrategias. Bolivia.

Beck S., Paniagua N., Preston D., 2001. Historia, ambiente y sociedad en Tarija, Bolivia. Instituto de Ecología, UMSA. La Paz. Bolivia. School of Geography. University of Leeds. United Kingdom.

Beven K., 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources* 16 (1): 41 – 51.

Beven K., Freer J., 2001. Equifinality, data assimilation and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*. Vol. 249: 1-4.

Beven K., Musy A., Higy C., 2001. Tribune libre: l'unicité de lieu, d'action et de temps. *Revue des Sciences de l'Eau* 14 (4): 525-533. Canada.

Biesbrouck B., 2003. CALIBRA spreadsheet to analyse output AVSWAT. Katholiek Universiteit Leuven, Faculty of Engineering. Leuven, Belgium.

Bosch, J., Hewlett J., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.

Brezó J.C., 2002. Valoración económica del servicio ambiental de provisión de agua de la reserva biológica Cordillera de Sama. Tarija, Bolivia.

Brozovich F., 2000. Proyecto agroforestal de áreas degradadas en zona de influencia del Proyecto Multiple San Jacinto. Tarija, Bolivia.

Bruijnzeel L., 2001. Hydrology of tropical montane cloud forests: a reassessment. *Land Use and Water Research* 1: 1.1-1.18. Vrije Universiteit Amsterdam. The Netherlands.

Calder I., R., 2002. Forests and hydrological services: reconciling public and science perceptions. Centre for Land Use and Water Resources Research, University of Newcastle upon Tyne, United Kingdom.

Caryglobal s.r.l., 2004. Batimetría del lago de San Jacinto. Informe final. Prefectura del departamento de Tarija. Tarija, Bolivia.

Casal G., Erazo O., 2003. Guía de árboles de Tarija. Tarija, Bolivia.

CGIAB-Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia. Boletín electrónico del proyecto Legislación de aguas: encontrando bases comunes. Site [www.aguabolivia.org](http://www.aguabolivia.org) (consulté en juillet 2004 et janvier 2005).

Chaponnière A., 2005. Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Institut national agronomique. Paris-Grignon, France.

CODETAR, CUMAT, Fundación Chile, 1988. Proyecto Piloto de restauración productiva de la cuenca del río Tolomosa, un modelo de desarrollo agroforestal. Anexo 1. Tarija, Bolivia.

CODETAR, Naciones Unidas, 1980. Investigación de aguas subterráneas en el valle central de Tarija. Proyecto BOL/78/006. Tarija, Bolivia.

CODETAR, PERTT, FAO, 1989. Levantamiento de suelos y evaluación de tierras de la cuenca alta del río Guadalquivir. Tarija, Bolivia.

Coffey M., Workman S., Taraba J., Fogle A., 2004. Statistical procedure for evaluating daily and monthly hydrologic model prediction. *American Society of Agricultural Engineers* 47(1): 59-68.

Coppus R., 2002. Landscape sensitivity to erosion in three semi-arid central andean geo-ecosystems. University of Amsterdam, Nederland.

Coro M., 1983. Regiones fitogeográficas de las serranías subandinas cubiertas de vegetación en el Chaco del Departamento de Tarija. Revista de Ciencia y Técnica. Vol. IV (5). UAJMS. Tarija, Bolivia.

Coro M., 1984. Algarrobo y la vegetación del valle central de Tarija. Revista de Ciencia y Técnica UAJMS. Tarija, Bolivia.

Dagnelie D., 2007. Statistique théorique et appliquée. De Boeck et Larcier s.a. Bruxelles, Belgique.

Dautrebande S., 1971. Evaluation des débits de crue de petits bassins versants ruraux en Belgique. Dissertation doctorale. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.

Dautrebande S., Sohier C., 2000. Modélisation intégrée du cycle hydrologique dans un contexte de changements climatiques. Rapport final. Programme global changement et développement durable. Services du Premier ministre. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.

Dautrebande S., Colard F., 2003. Cartographie des zones à risques de ruissellement et d'érosion en région wallonne. Fascicule 1: méthodologie et cas pilotes. Fascicule 2: guide méthodologique pour le choix d'aménagements appropriés en matière de conservation des sols et des eaux. Direction générale de l'Agriculture, Région wallonne. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.

Dautrebande S., Nonguierma A. Modélisation hydrologique de petits bassins versants ruraux sahéliens: apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la détermination des paramètres. Centre régional AGRHYMET, Niamey, Niger. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.

Debauche O., 2004. Comparaison des méthodes « Frühling » et « isochrones » pour les crues de projet des petits bassins versants. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'études approfondies en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux. Belgique.

DelaFuente M., 2002. Un mouvement social face à la privatisation des ressources. Conférence prononcée à Créteil le 22 avril 2002. Val de Marne, France.

Demarcin P., 2006. Contribution à l'analyse de l'érosion hydrique en ravines dans le bassin versant de la rivière Tolomosa, Tarija, Bolivie. Travail de fin d'études. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Gembloux, Belgique.

dePatoul C., 2004. La Guerre de l'eau à Cochabamba et son importance dans le processus de privatisation des ressources hydriques en Bolivie. HA301 Hydrologie des bassins versants. D.E.A. en sciences agronomiques et ingénierie biologique préalable au doctorat. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Gembloux, Belgique.

dePatoul C., 2004. Atlas eco-thématique du bassin versant de la rivière Tolomosa, Tarija, Bolivie. Travail de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes approfondies en Sciences agronomiques et Ingénierie biologique préalable au doctorat. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Gembloux, Belgique.

Derruau M., 1995. Précis de géomorphologie. Masson. Paris, France.

DiLuzio M., Neitsch S., L., Arnold, J., G., Srinivasan R., 2002. ArcView interface for SWAT 2000. Soil and water assessment tool. User's manual. Grassland, Soil and research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland research Center. Temple, Texas.

Dixon A. J., Hufschmidt M., 1990. Economic valuation techniques for the environment. A case study workbook. The Johns Hopkins University press. Baltimore and London. USA and UK.

- Dunne T., Black, R. D., 1970. An experimental investigation of runoff production in impermeable soils." *Water Resources Research*, 6, 478-490.
- Espinoza L., Paredes D., 1995. Estudio semidetallado de suelos y de la calidad del sitio, para el estudio del control de sedimentos en la cuenca del río Tolomosa. CODETAR. Tarija, Bolivia.
- Espinoza L., 1996. Mapeo de la erosión en la cuenca del río Tolomosa. VIVE-LIDEMA. Tarija, Bolivia.
- Espinoza L., Ruiz J., Beltrán R., 2001. Mapas temáticos para la parte baja de las cuencas de los ríos Tolomosa y la Victoria adyacentes con la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama Zona 2. PROMETA. Tarija, Bolivia.
- Espinoza L., 2002. Estimación del riesgo a la erosión en la cuenca del río Tolomosa. Tesis de postgrado, UAJMS. Tarija, Bolivia.
- FAO, 1960. Practicas de plantación forestal en América latina. Cuaderno de fomento forestal N° 15. Roma, Italia.
- FAO, 1976. Schéma pour l'évaluation des terres. Rome, Italie.
- FAO, 1989. World reference base for soil. Rome, Italy.
- FAO-ISRIC, 1990. Guidelines for soil description, 3rd edition. Rome, Italy.
- FAO, 1991. Land use planning applications. Proceedings of the FAO expert consultation 1990. Rome, Italy.
- FAO, 2001. Lecture notes on the major soils of the world. Edited by Driessen P., Deckers J., Spaargaren O., Nachtergaele F. Rome, Italy
- FAO, 2002. Bulletin 9 des terres et des eaux de la FAO. Relations terre-eau dans les bassins versants ruraux. Les impacts de l'utilisation des terres sur les ressources en eau: un examen de la littérature existante. Benjamin Kiersch, Division de la mise en valeur des terres et des eaux, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie
- FAO, 2007. Los recursos hídricos en América latina y el Caribe. Van Wambeke J. Chile.
- FAO, UNESCO, 1990. Mapa mundial de suelos, leyenda revisada. Roma, Italia
- FAO-ISRIC, 1990. Guidelines for soil description, 3rd Edición, Rome, Italy.
- Finch J., W., 1998. Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model. Sensivity to land surface parameters. *Journal of Hydrology* 211: 112 – 25.
- Fohrer N., Möller D., Steiner N., 2002. An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth* 27 (9-10): 655-662.
- Forum alternatif mondial de l'eau, 2003. Pour une autre politique de l'eau; propositions et engagements. Déclaration de conclusion. Florence, Italie.
- Galarza O., 1997. Clasificación de suelos a nivel general en la cuenca de Tajzara. Tesis de grado UAJMS. Tarija, Bolivia.
- Gassman P. W., Osei E., Saleh A., Hauck L., 2002. Application of an environmental and economic modeling system for watershed assessments. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 38(2): 423-438.
- Gassman P. W., Reyes M., R., Green C., H., Arnold J., G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol.50 (4): 1211-1250.

- GEOBOL-ERTS, 1982. Estudio integrado de los recursos naturales del Centro y Sur Bolivianos. Informe técnico. Servicio Geológico de Bolivia. La Paz, Bolivia.
- GEOBOL-SGAB, 1991. Hojas 6628 y 6629. Escala 1:100.000. La Paz, Bolivia.
- Girard M. C., 1999. Traitement des données de télédétection. Ed. Dunod. Paris, France.
- Greene W., 2002. Econometric analysis; LIMDEP Users Manual. Prentice Hall.
- Gutiérrez J., 1989. Tenencia y uso de la tierra en el departamento de Tarija. Talleres CEDLA N° 7: 245. La Paz, Bolivia.
- Hernandez M., Miller S., Goodrich D., Goff B., Kneper W., Edmonds C., Jones K., 2000. Modelling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. Environmental Monitoring and Assessment. 64(1).
- Heuvelmans G., Garcio Qujano J., Muys B., Feyen J., Coppin P., 2005. Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO2 emission reduction scenarios. Hydrol. Process. 19(3): 729-748.
- INE-Instituto nacional de estadísticas, 2001. Censo nacional de población y vivienda. Tarija: resultados departamentales ([www.ine.gov.bo](http://www.ine.gov.bo)). La Paz, Bolivia.
- Iriarte Ardaya R., Quisbert Choque M., 1978. Estudio semidetallado de suelos. Valle Central de Tarija. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios MACA. La Paz, Bolivia.
- Jetté C., Rojas R., 1998. Tarija, pobreza, género y medio ambiente. Centro de estudios y proyectos. La Paz, Bolivia.
- Kirsch K., Kirsch A., Arnold J. G., 2002. Predicting sediment and phosphorus loads in the Rock River basin using SWAT. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 45(6): 1757-69.
- Lemberg B., Mjelde J., Conner J., Griffin R., Rosenthal W., Stuth J., 2002. An interdisciplinary approach to valuing water from brush control. J. Amer. Water Resour. Assoc. 38(2): 409-422.
- Lorz c., Vollk M., Schmidt G., 2006. Automatic calibration and functionality of forest in a modeling framework for river basin management. For. Ecol. Mgmt. 248 (1-2): 17-25.
- Madsen H., 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modeling using automatic calibration with multiple objectives. Advances in Water Resources 26 (2): 205 – 216.
- Maidment D., R., 1992. Handbook of hydrology. Mc Graw – Hill.
- Matthews O., Brookshire D., Campana M., 2001. The economic value of water: results of a workshop in Caracas, Venezuela, November 2000. Water Resources Program, publication No. WRP- 4, August 2001. University of New Mexico, United States.
- Mergeai G., 2007. Analyse-diagnostic et amélioration des systèmes de production agricole en régions tropicales (PC 302). Notes de cours. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Université de Liège. Belgique.
- Miller S., Kepner W., Mehaffey M., Hernandez M., Miller R., Goodrich D., Devonald K., Heggem D., Miller W., 2002. Integrating landscape assessment and hydrologic modelling for land cover change analysis. Journal of the American Water Resources Association 38(4): 915-929.
- Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente, 1995. Memoria explicativa del mapa forestal de Bolivia. La Paz, Bolivia.

Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente, Viceministerio de recursos naturales y medio ambiente, Dirección general de cuencas y recursos hídricos, 2005. Norma técnica de clasificación de tierras en Bolivia según su capacidad de uso mayor. La Paz, Bolivia.

Ministerio de desarrollo sostenible y planificación, 1998. Normas técnicas para la elaboración de instrumentos de manejo forestal (inventarios, planes de manejo, planes operativos, mapas) en propiedades privadas o concesiones con superficies mayores a 200 hectáreas. Resolución ministerial N°248/98 26. La Paz, Bolivia.

Molina C. J., 1992. Verificación de la aplicabilidad de los modelos USLE, MUSLE, y ONSTAD-FOSTER. La Paz, Bolivia.

Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A., 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agriculture and Forest Meteorology*. 98-99; 257-277.

Muleta M., Nicklow J., Bekele E., 2007. Sensitivity of a distributed watershed simulation model to spatial scale. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(2): 163-172.

Musabyimana J.,C., 2006. Evaluation des flux hydriques du bassin de Rugezi au Rwanda à l'aide d'un modèle spatialisé. Travail de fin d'études. Faculté universitaire des Sciences agronomiques. Gembloux, Belgique.

Musy A., 2004. Cours d'hydrologie générale (en ligne). EPFL. Lausanne, Suisse.

Mutthuwatta L., P., 2004. Long term rainfall runoff lake level modelling of the lake Naivasha basin. Kenya.

Nearing M. A., Lane L. J., Lopes V. L., 1994. Modelling soil erosion. In: R. Lal (Editor), *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society, pp. 127-156. Ankeny, Iowa, USA.

Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., Srinivasan R., Williams J. R., King K. W., 2002. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. Grassland, Soil and research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland research Center. Temple, Texas.

Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., Srinivasan R., Williams J. R., 2002. Soil and water assessment tool. User's manual. Grassland, Soil and research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland research Center. Temple, Texas.

Nicks A., 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington DC, United States.

North J., Griffin C., 1993. Water source as a housing characteristic: hedonic property valuation and willingness-to-pay for water. *Water Resources Research*. Vol. 29, No. 7, pp. 1923-1929.

PEA(a)-Programa Estratégico de Acción para la cuenca Binacional del río Bermejo, 1998. Geomorfología, suelos y clima del valle central de Tarija. Vol. III. Tarija. Bolivia.

PEA(b)-Programa Estratégico de Acción para la cuenca Binacional del río Bermejo, 1998. Diagnóstico de las áreas seleccionadas, microcuenca quebradas La Tablada. Tarija, Bolivia.

PEA-Programa Estratégico de Acción para la cuenca Binacional del río Bermejo, SERNAP-Servicio Nacional de Areas Protegidas, OEA-Organización de Estados Americanos, 2004. Plan de manejo de la reserva biológica Cordillera de Sama. Tarija, Bolivia.

PEA-Programa Estratégico de Acción para la cuenca Binacional del río Bermejo, 2005. Diagnóstico integral. Reserva biológica de la Cordillera de Sama. Tarija, Bolivia.

Pearce D., Whittington D., Georgiou S., Moran D. Economic values and the environment in the developing world. The Centre for Social and Economic Research on the Global Environment

(CSERGE). University College London and University of East Anglia United Kingdom and Hill. Environmental Economics Series Paper No. 14.

Pérez Soba Baró A., 1985. Reconocimiento general para la restauración hidrológico-forestal de la alta cuenca del río Guadalquivir. Proyecto PERTT/FAO. Tarija, Bolivia.

PERTT-Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras, 1993. Diagnóstico de las actividades en la cuenca del río Guadalquivir. Periodo 1978 a 1992. Tarija, Bolivia.

Poupeau F., 2002. Et l'eau de La Paz fut privatisée. Le Monde Diplomatique. <http://www.monde-diplomatique.fr/2002/05/POUPEAU/16514> (consulté en avril 2006).

PROBONA-Programa de bosques nativos andinos. IGM-Instituto geografico militar, 1995. Formaciones vegetacionales del área andina de Bolivia; mapa 1:1.000.000. La Paz, Bolivia. Proyecto Multiple San Jacinto

Qiu Z., Prato T., 1998. Economic evaluation of riparian buffers in an agricultural watershed. J. Amer. Water Resour. Assoc. 34(4): 877-890.

Rogers P., Bhatia R., Huber A., 1998. Water as a social and economic good: how to put the principle into practice. Global Water Partnership. Stockholm, Sweden.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO N°70. Rome, Italie.

Rosen S., 1974. Hedonic prices and implicit markets: product differentiation in pure competition. Journal of Political Economy, vol. 82, n°1.

Rossiter D.G., 1994. Evaluación de tierras: éxitos y retos. Department of soil, crop & atmospheric sciences, Cornell University. New York, United States.

Rossiter D.G., Jiménez T., Van Wambeke A., 1995. Sistema automatizado para la evaluación de tierras ALES. Manual para usuarios. Cornell University. Ithaca, USA.

Rouhani H., Willems P., Feyen J., 2007. Congreso internacional sobre desarrollo, medio ambiente y recursos naturales: sostenibilidad a múltiples niveles y escala. Universiada Mayor de San Simon. Cochabamba, Bolivia.

Saleh A., Arnold J.G., Gassman P., Hauck L., Rosenthal W., Williams J., McFarland A., 2000. Application of SWAT for Upper North Bosque River watershed. Trans. ASAE 45(3): 1077-87.

Santh, C., Arnold J., Williams J., Dugas W., Hauck L., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. Am. Water Resour. Assoc. 37 (5): 1169-88.

SENAMHI-Servicio nacional de meteorología y hidrología, 2002. Tablas de datos climatológicos. Tarija, Bolivia.

SENASAG-Servicio nacional de sanidad agropecuaria, 2005. Catastro de sanidad agropecuaria. La Paz, Bolivia.

Sharpley A.N., Williams J.R., 1990. EPIC: erosion productivity impact calculator, 1. Model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.

Spruill C. A., Workman S. R., Taraba J. L., 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watershed using the SWAT model. Soil and Water Division, ASEAE vol. 43(6). United States.

Srinivasan R., Arnold J., Jones C., 1998. Hydrologic modeling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool. Water Resour. Develop. 14 (3): 315-25.

Suárez M., 1996. Geología del cuaternario de la cuenca pleistocena de Tarija. Memorias del XII congreso geológico de Bolivia, tomo II. Tarija, Bolivia.

SWAT 2nd international conference, 2005. Istituto di Ricerca sulle Acque, Bari, Italy

SWAT 4th international conference, 2007. UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

Tripathi M., Raghuwanshi N., Rao G., 2006. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes* 20(5): 1137-15.

Turner K., Georgiou S., Clark R., Brouwer R., 2004. Economic valuation of water resources: from the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Report to the FAO. Centre for Social and Economic Research of the Global Environment (CSERGE), School of Environmental Sciences. University of East Anglia. United Kingdom.

Turpin N.; Bontems P., Rotillon G., Bärlund I., Kaljonen M., Tattari s., Feichtinger F., Strauss P., Haverkamp R., Garnier M., Lo Porto A., Benigni G., Leone A., Nicoletta M., Eklo O., Romstad E., Bioteau T., Birgand F., Bordenave P., Laplana R., Lescot J., PietL., Zahm F., 2005. AgriBMPWater: systems approach to environmentally acceptable farming. *Environ. Model. & Software* 20(2): 187-196.

UNDP/ODS, 2002. Providing global public goods: managing globalization. 25 questions & answers. New York, United States.

United Nations Environment Programme- UNEP, 1994. Economic values and the environment in the developing world. A report to the United Nations Environment Programme. The Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE) University College London and University of East Anglia. Environmental Economics Series Paper No. 14. United Kingdom.

UNESCO, 1973. International classification and mapping of vegetation, ecology and conservation. Paris, France.

Unzueta O., 1975. Memoria explicativa del mapa ecológico de Bolivia. La Paz, Bolivia.

USAID, 1986. Perfil ambiental de Bolivia. La Paz, Bolivia.

USDA, 1998. Keys to soil taxonomy. Eighth edition.

Valenzuela C. R., Beck M., 1998. Modelo de erosión cuenca Khenko Mayo Sacaba. Centro de Levantamiento Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales. Cochabamba. Bolivia.

Vásquez Zambrano R. F., 2003. Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Van Damme P., 2002. Disponibilidad, uso y calidad de los recursos hídricos en Bolivia. Cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible, Johannesburgo. CONIAG, CGIAB.

Verstappen H., Van Zuidam R., 1991. El Sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. ITC publication N° 10. Enschede, The Netherlands.

Vida Verde, 2006. Proyecto de emergencia para la producción de agua en la reserva biológica, Cordillera de Sama. Implementación de barreras vivas para el control de la erosión y protección de las fuentes de agua. Banco interamericano de Desarrollo, Prefectura del departamento de Tarija. Tarija, Bolivia.

White K., Chaubey I., 2005. Sensitivity analysis, calibration and validation for a multisite and multivariable SWAT model. *Journal of the American Water Resources Association* 41 (5): 1077-1089.

Whittaker G., Fare R., Srinivasan R., Scott D., 2003. Spatial evaluation of alternative nonpoint nutrient regulatory instruments. *Water Resour. Res.* 39(4).

Williams J., Renard K., Dyke P., 1983. EPIC. A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil Water Conservation* 38(5): 381-383.

World Bank, 2003. Sector strategy: strategic directions for engagement.

Yang Y., 1997. Evaluating agricultural non-point source pollution using the soil and water assessment tool. University of New Brunswick. United States.

ZONISIG (a)-Proyecto de Zonificación agroecológica, 2001. Procedimientos metodológicos de la zonificación agroecológica y socioeconómica. Dirección general de Planificación y Ordenamiento Territorial, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Cooperación del gobierno de los Países Bajos. La Paz, Bolivia.

ZONISIG (b)-Proyecto de Zonificación agroecológica, 2001. Zonificación agroecológica y socioeconómica. Dirección general de Planificación y Ordenamiento Territorial, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Cooperación del gobierno de los Países Bajos. La Paz, Bolivia.



COMMUNAUTE FRANÇAISE DE BELGIQUE  
ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-EUROPE  
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

**ALLOCATION, MODELISATION ET VALORISATION DES  
RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE  
TOLOMOSA (BOLIVIE)**

**Annexes**

Claude de PATOUL

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences  
agronomiques et ingénierie biologique

Co-Promoteur: Dr A. Degré  
2008

Co-promoteur: Prof. D. Xanthoulis



**ANNEXE I-1: reportage photographique sur le bassin  
versant de la rivière Tolomosa**

**PHOTOGRAPHIES DE LA SERIE A: PAYSAGES DU BASSIN VERSANT  
DE LA TOLOMOSA**



*Photo A1: paysage de hautes montagnes près de Calderilla Chica (Agrosig, 2004)*



*Photo A2: vallée glaciaire près de la localité de Calderilla Chica (Agrosig, 2004)*



*Photo A3: vue panoramique des versants surplombant la localité de San Pedro de Sola (Agrosig, 2004)*



*Photo A4: vue panoramique de versants découpés dans le sous-bassin de Sola (INIBREH, 2005)*



*Photo A5: vue générale de versants découpés près de la localité de Pinos Sud (Agrosig, 2004)*



*Photo A6: vue panoramique de piedmonts alluviaux près de la localité de San Pedro de Sola (Agrosig, 2004)*



*Photo A7: vue d'une terrasse alluviale sur des dépôts fluvio-lacustres près de la localité de Tolomosa Grande (INIBREH, 2005)*



*Photo A8: terrasse fluvio-lacustre avec érosion sévère dans la partie nord-est du bassin (INIBREH, 2005)*

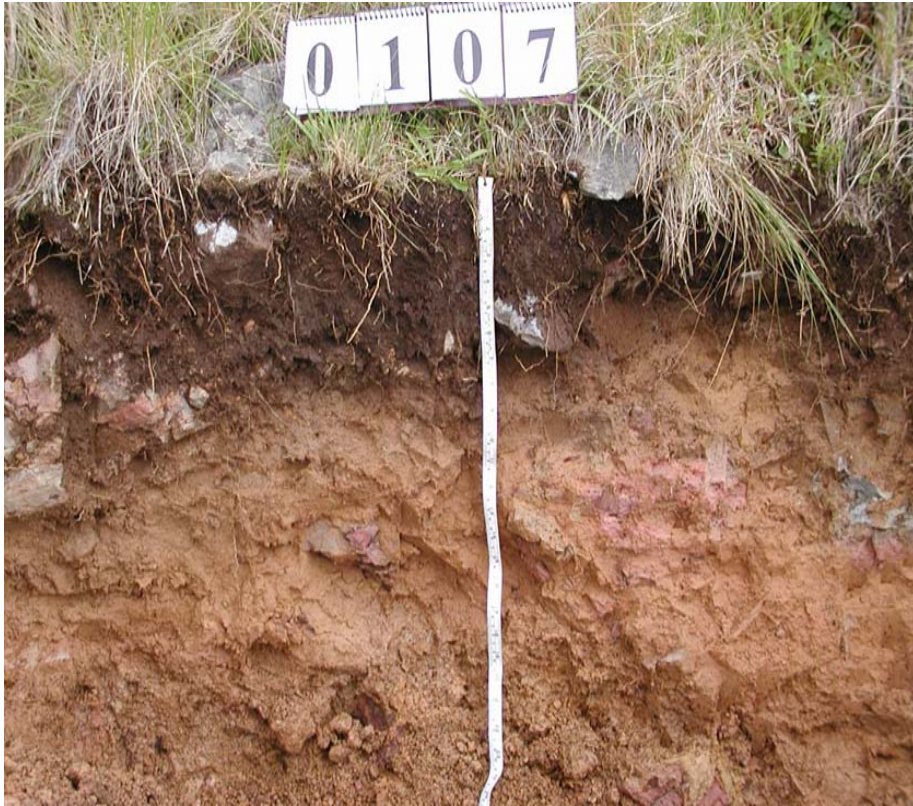
**PHOTOGRAPHIES DE LA SERIE B: SOLS DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA**



*Photo B1: levé pédologique (Agrosig, 2004)*



*Photo B2: profil développé sur des sédiments d'origine lacustre, localité de Pinos Sud (Agrosig, 2004)*



*Photo B3: profil montrant un horizon cambique, Pinos Norte (Agrosig, 2004)*



*Photo B4: profil alluvial près de la localité de San Pedro de Sola (Agrosig, 2004)*

**PHOTOGRAPHIES DE LA SERIE C: COUVERTURE VEGETALE DU  
BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA**



*Photo C1: inventaire de la couverture végétale près de la localité de San Pedro de Sola (Agrosig, 2004)*



*Photo C2: bois de pins des montagnes (Podocarpus parlatorei) près de la localité de San Pedro de Sola (Agrosig, 2004)*



*Photo C3: bosquet de Polylepis près de la localité de Calderia Chica (Agrosig, 2004)*



*Photo C4: broussailles arbustives basses (matorral) denses sur versants (Waykho Grande Mendoz) (Agrosig, 2004)*



*Photo C5: végétation herbacée avec présence de touffes (amacollado)  
autour de la localité de Pinos Sud (Agrosig, 2004)*

**PHOTOGRAPHIES DE LA SERIE D: RIVIERES DU BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA**



*Photo D1: vue aval de la rivière Sola (Agrosig, 2004)*



*Photo D2: vue partielle de la rivière Pinos près de la localité de Bella Vista (INIBREH, 2005)*



*Photo D3: vue partielle de la rivière Mena près de la localité de Churqui  
(INIBREH 2005)*



*Photo D4: vue panoramique du réservoir de San Jacinto (Agrosig, 2004)*

**PHOTOGRAPHIES DE LA SERIE E: OCCUPATION DES TERRES DU  
BASSIN VERSANT DE LA TOLOMOSA**



*Photo E1: culture de la pomme de terre près de la localité de San Andres  
(Agrosig, 2004)*



*Photo E2: vue panoramique de la zone de cultures de Pampa Redonda  
(Agrosig, 2004)*



*Photo E3: zone agricole autour de la localité de Calderilla Chica (Agrosig, 2004)*



*Photo E4: pâturage avec ovins courtisés par des pics-boeufs près de la localité de Guerrahuayco (Agrosig, 2004)*



*Photo E5: pâturage extensif avec bovins et ovins près de la localité de Pinos Sud (Agrosig, 2004)*



*Photo E6: pâturage extensif avec bovins autour de la localité de Calderilla Chica (Agrosig, 2004)*



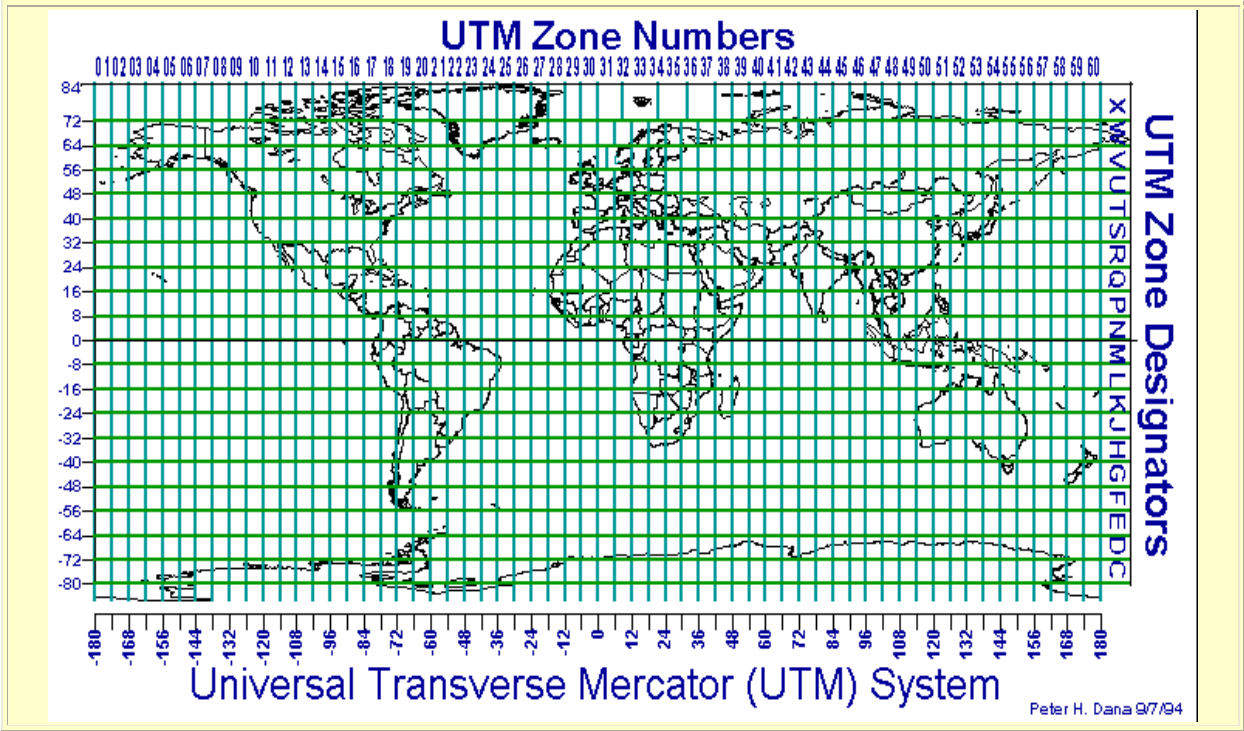
*Photo E7: plantation d'Eucalyptus spp. près de la localité de Guerrahuayco  
(Agrosig, 2004)*

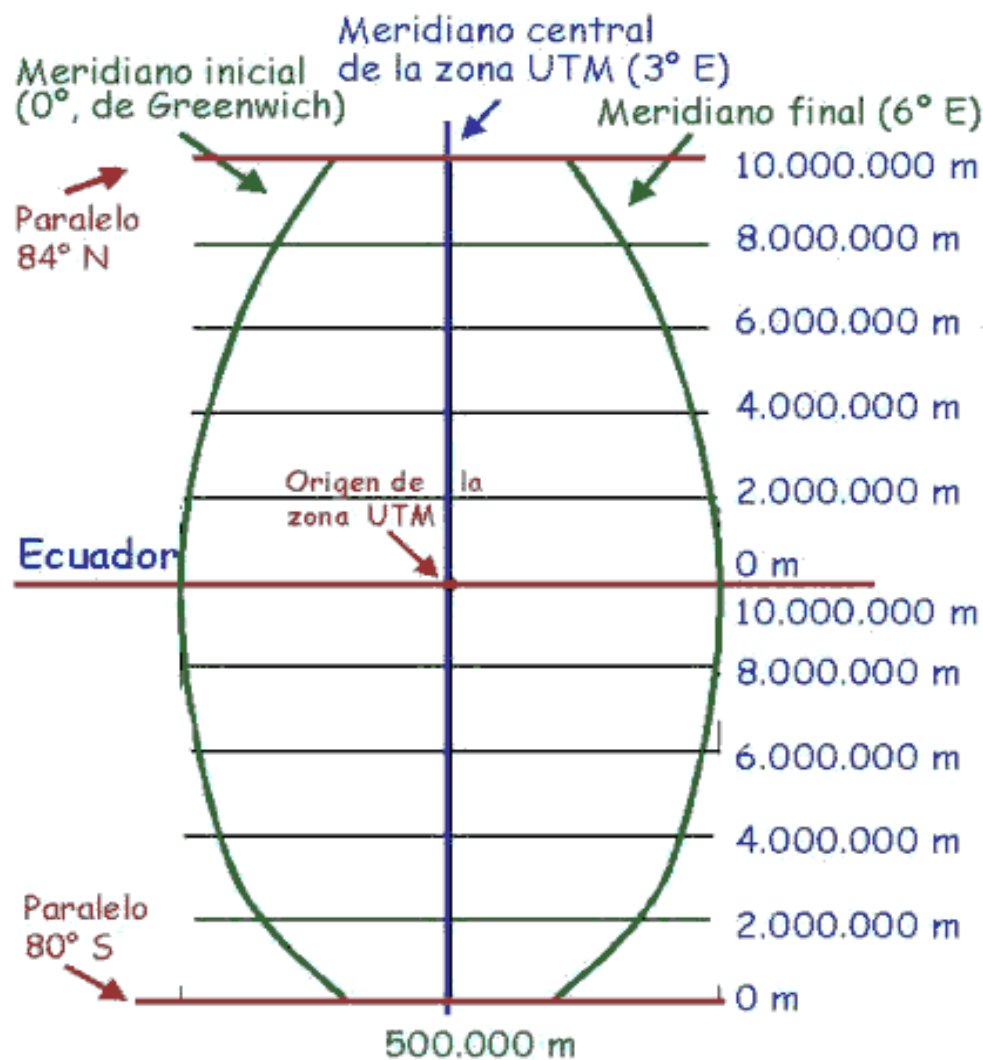
**ANNEXE I-2: zone UTM de la Bolivie et du bassin versant  
de la Tolomosa**



Les zones UTM se numérotent de 1 à 60 vers l'Est et commencent à la longitude 180 degrés W., avec une largeur de 6 degrés. La Bolivie se trouve dans la zone 20.

Au méridien central de chaque zone, on donne une projection horizontale de 500.000 m et une projection verticale de 0 à l'équateur pour la partie nord de chaque zone et 10 millions de m pour la partie sud.





## Características de la zona UTM 31

- Los límites de una zona UTM coinciden con dos meridianos separados 6°.
- El centro de la zona coincide con un meridiano, el meridiano central, que señala al norte.
- El origen de la coordenada UTM es la intersección del meridiano central con el ecuador. A este Origen se le da un valor relativo 0 km Norte, 500 km Este para el hemisferio norte, y 10.000km norte y 500 km Este para el hemisferio sur. Así no hay números negativos.
- Las zonas UTM se extienden desde el paralelo 84° N hasta el 80° S. Hay 60 zonas UTM, con 6° cada una, que completan los 360° de la Tierra.
- Las zonas UTM se estrechan y sus áreas son menores conforme nos acercamos a los polos.

**ANNEXE I-3: fiche de terrain utilisée pour les levés  
pédologiques**



**Aspectos del terreno**

1. ID Mapa	2. ID Unidad de terreno
3. Código fisiográfico	5. Area de la Unidad.....km <sup>2</sup>
4. Litología	6. Proporción con agua .....%
7. Nombre de la unidad	
8. Disección	
9. Relieve	
10. Elevación máxima	11. Elevación mínima
12. Comentarios	

**Componentes del terreno**

2. ID Unidad de terreno	Código Fisiográfico
13. ID Componente	
14. Nombre del componente .....	.....
15. Proporción componente/ unidad .. %	
16. Elevación: máx. y mín. del componente	
Uso de la tierra/ proporción componente	Tipo de cobertura/ proporción componente
Dominante ..... / ... %	Dominante ..... / ... %
Secundario ..... / .. %	Secundario ..... / .. %
Menor ..... / .. %	Menor ..... / .. %
18. Clase de pendiente	20. Longitud de la pendiente
19. Forma de la pendiente	
21. Litología .....	25. Drenaje superficial
22. Profundidad hasta la roca .... m	26. Frecuencia de inundación
23. Roccosidad superficial	27. Duración de la inundación
24. Pedregosidad superficial	
29. Tipo de erosión ..	31. Grado de erosión
30. Area erosionada	32. Encostramiento

**Identificación del perfil y ubicación geográfica**

33. ID Perfil .. / .. / .....	37. Latitud UTM (Y) .....
35. Fecha de muestreo .. / .. / ..	38. Longitud UTM (X) y zona .....
36. Autores .....	39. Latitud geográfica .....
	40. Longitud geográfica .....
41. Localización .....	
42. Elevación .... msnm	
43. Pendiente ... %	56. Drenaje natural o artificial
44. Forma de la pendiente	57. Drenaje interno
45. Topografía	58. Drenaje externo
46. Posición topográfica ..	59. Condición de humedad
47. Microrelieve ..	60. Clasificación FAO .....
48. Cobertura ..	61. Soil Taxonomy .....
49. Uso de la tierra ...	
51. Materia org. en superficie	
52. Influencia humana ..	
53. Profundidad efectiva	
54. Profundidad de raíces	
55. Profundidad napa freática	

**Características morfogénicas del perfil del suelo**

HOR.		PROF.		CO LOR	MOTEAOS					TE X	ESTR.			CONSIST.				CUTANES			
de	n°	sup	Inf		Ab	Ta	ct	co	ni		ti	gr	ta	S e	hu	ad	pl	ab	co	Ti	u b

**Vínculos entre atributos del terreno y atributos del suelo**

33. ID Perfil .....	2 y 14. Unidad y Componente de Terreno ... / .
	34. Representatividad del perfil



**ANNEXE II-1: tableaux des débits journaliers observés à l'exutoire du bassin versant de la Tolomosa de 1978 à 1984**



Débits observés ( $Q_{obs}$ ) d'août 1976 à juillet 1977 - Bassin de la Tolomosa									
Date	$Q_{obs}$ (mm)	Date	$Q_{obs}$ (mm)	Date	$Q_{obs}$ (mm)	Date	$Q_{obs}$ (mm)	Date	$Q_{obs}$ (mm)
1-Aug-1976	0.3	1-Sep-1976		1-Oct-1976		1-Nov-1976	0.1	1-Dec-1976	0.8
2-Aug-1976		2-Sep-1976	0.2	2-Oct-1976	0.1	2-Nov-1976		2-Dec-1976	
3-Aug-1976	0.3	3-Sep-1976		3-Oct-1976		3-Nov-1976	0.2	3-Dec-1976	0.3
4-Aug-1976		4-Sep-1976	0.2	4-Oct-1976	0.2	4-Nov-1976		4-Dec-1976	
5-Aug-1976	0.3	5-Sep-1976		5-Oct-1976		5-Nov-1976	0.1	5-Dec-1976	0.4
6-Aug-1976		6-Sep-1976	0.2	6-Oct-1976	0.1	6-Nov-1976		6-Dec-1976	
7-Aug-1976	0.3	7-Sep-1976		7-Oct-1976		7-Nov-1976	0.2	7-Dec-1976	0.3
8-Aug-1976		8-Sep-1976	0.2	8-Oct-1976	0.1	8-Nov-1976		8-Dec-1976	
9-Aug-1976	0.4	9-Sep-1976		9-Oct-1976		9-Nov-1976	0.1	9-Dec-1976	0.6
10-Aug-1976		10-Sep-1976	0.2	10-Oct-1976	0.1	10-Nov-1976		10-Dec-1976	
11-Aug-1976	0.3	11-Sep-1976		11-Oct-1976		11-Nov-1976	0.1	11-Dec-1976	0.3
12-Aug-1976		12-Sep-1976	0.2	12-Oct-1976	0.1	12-Nov-1976		12-Dec-1976	
13-Aug-1976	0.3	13-Sep-1976		13-Oct-1976		13-Nov-1976	0.2	13-Dec-1976	0.4
14-Aug-1976		14-Sep-1976	0.2	14-Oct-1976	0.1	14-Nov-1976		14-Dec-1976	
15-Aug-1976	0.3	15-Sep-1976		15-Oct-1976		15-Nov-1976	0.4	15-Dec-1976	0.4
16-Aug-1976		16-Sep-1976	0.2	16-Oct-1976	0.1	16-Nov-1976		16-Dec-1976	
17-Aug-1976	0.3	17-Sep-1976		17-Oct-1976		17-Nov-1976	0.2	17-Dec-1976	1.1
18-Aug-1976		18-Sep-1976	0.2	18-Oct-1976	0.1	18-Nov-1976		18-Dec-1976	
19-Aug-1976	0.3	19-Sep-1976		19-Oct-1976		19-Nov-1976	0.2	19-Dec-1976	0.4
20-Aug-1976		20-Sep-1976	0.2	20-Oct-1976	0.1	20-Nov-1976		20-Dec-1976	
21-Aug-1976	0.3	21-Sep-1976		21-Oct-1976		21-Nov-1976	0.2	21-Dec-1976	0.4
22-Aug-1976		22-Sep-1976	0.2	22-Oct-1976	0.1	22-Nov-1976		22-Dec-1976	
23-Aug-1976	0.3	23-Sep-1976		23-Oct-1976		23-Nov-1976	0.2	23-Dec-1976	0.5
24-Aug-1976		24-Sep-1976	0.2	24-Oct-1976	0.1	24-Nov-1976		24-Dec-1976	
25-Aug-1976	0.3	25-Sep-1976		25-Oct-1976		25-Nov-1976	0.1	25-Dec-1976	0.8
26-Aug-1976		26-Sep-1976	0.2	26-Oct-1976	0.1	26-Nov-1976		26-Dec-1976	
27-Aug-1976	0.2	27-Sep-1976		27-Oct-1976		27-Nov-1976	0.2	27-Dec-1976	0.4
28-Aug-1976		28-Sep-1976	0.2	28-Oct-1976	0.1	28-Nov-1976		28-Dec-1976	
29-Aug-1976	0.3	29-Sep-1976		29-Oct-1976		29-Nov-1976	0.7	29-Dec-1976	1.6
30-Aug-1976		30-Sep-1976	0.1	30-Oct-1976	0.1	30-Nov-1976		30-Dec-1976	
31-Aug-1976	0.3			31-Oct-1976				31-Dec-1976	0.7
								1-Jan-1977	
								2-Jan-1977	0.8
								3-Jan-1977	0.5
								4-Jan-1977	
								5-Jan-1977	1.0
								6-Jan-1977	
								7-Jan-1977	1.0
								8-Jan-1977	0.7
								9-Jan-1977	
								10-Jan-1977	0.6
								11-Jan-1977	
								12-Jan-1977	0.6
								13-Jan-1977	
								14-Jan-1977	0.5
								15-Jan-1977	
								16-Jan-1977	1.1
								17-Jan-1977	
								18-Jan-1977	0.7
								19-Jan-1977	
								20-Jan-1977	1.3
								21-Jan-1977	
								22-Jan-1977	0.8
								23-Jan-1977	
								24-Jan-1977	
								25-Jan-1977	2.2
								26-Jan-1977	
								27-Jan-1977	1.7
								28-Jan-1977	1.5
								29-Jan-1977	
								30-Jan-1977	1.3
								31-Jan-1977	

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1976 à juillet 1977 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)		
1-Feb-1977	2.0	1-Mar-1977	4.9	1-Apr-1977	1.8	1-May-1977		1-Jun-1977	0.7	1-Jul-1977	0.5
2-Feb-1977		2-Mar-1977	4.0	2-Apr-1977	1.8	2-May-1977		2-Jun-1977	0.7	2-Jul-1977	0.5
3-Feb-1977	1.4	3-Mar-1977	3.3	3-Apr-1977		3-May-1977	1.4	3-Jun-1977		3-Jul-1977	0.5
4-Feb-1977		4-Mar-1977	3.0	4-Apr-1977	1.4	4-May-1977	1.3	4-Jun-1977	0.7	4-Jul-1977	0.5
5-Feb-1977	1.2	5-Mar-1977		5-Apr-1977	1.6	5-May-1977	1.3	5-Jun-1977		5-Jul-1977	0.5
6-Feb-1977		6-Mar-1977	2.3	6-Apr-1977	1.5	6-May-1977	1.3	6-Jun-1977	0.6	6-Jul-1977	0.5
7-Feb-1977	1.2	7-Mar-1977	2.2	7-Apr-1977		7-May-1977	1.2	7-Jun-1977		7-Jul-1977	0.4
8-Feb-1977	1.2	8-Mar-1977	2.2	8-Apr-1977		8-May-1977	1.2	8-Jun-1977	0.7	8-Jul-1977	0.4
9-Feb-1977		9-Mar-1977	2.2	9-Apr-1977		9-May-1977	1.2	9-Jun-1977	0.6	9-Jul-1977	0.4
10-Feb-1977	3.7	10-Mar-1977	2.0	10-Apr-1977		10-May-1977	1.2	10-Jun-1977	0.6	10-Jul-1977	0.4
11-Feb-1977		11-Mar-1977	4.9	11-Apr-1977		11-May-1977	1.1	11-Jun-1977	0.5	11-Jul-1977	0.4
12-Feb-1977	1.6	12-Mar-1977	2.2	12-Apr-1977		12-May-1977	1.1	12-Jun-1977	0.5	12-Jul-1977	0.4
13-Feb-1977		13-Mar-1977		13-Apr-1977	1.4	13-May-1977	1.1	13-Jun-1977	0.6	13-Jul-1977	0.4
14-Feb-1977	1.2	14-Mar-1977	3.1	14-Apr-1977	1.4	14-May-1977	1.0	14-Jun-1977	0.5	14-Jul-1977	0.4
15-Feb-1977	2.5	15-Mar-1977	2.3	15-Apr-1977	1.4	15-May-1977	1.0	15-Jun-1977	0.4	15-Jul-1977	0.4
16-Feb-1977	1.6	16-Mar-1977	2.6	16-Apr-1977		16-May-1977	1.0	16-Jun-1977	0.4	16-Jul-1977	0.4
17-Feb-1977	2.2	17-Mar-1977	2.3	17-Apr-1977		17-May-1977	1.0	17-Jun-1977	0.6	17-Jul-1977	0.5
18-Feb-1977	5.7	18-Mar-1977	2.4	18-Apr-1977	2.7	18-May-1977	1.1	18-Jun-1977	0.6	18-Jul-1977	
19-Feb-1977	3.3	19-Mar-1977	3.2	19-Apr-1977	1.6	19-May-1977	1.1	19-Jun-1977	0.6	19-Jul-1977	
20-Feb-1977	3.4	20-Mar-1977		20-Apr-1977	4.8	20-May-1977	0.9	20-Jun-1977	0.6	20-Jul-1977	
21-Feb-1977	3.1	21-Mar-1977	1.7	21-Apr-1977	1.8	21-May-1977	1.0	21-Jun-1977	0.6	21-Jul-1977	0.4
22-Feb-1977		22-Mar-1977	1.6	22-Apr-1977	1.5	22-May-1977	0.9	22-Jun-1977	0.6	22-Jul-1977	0.4
23-Feb-1977	3.7	23-Mar-1977	2.4	23-Apr-1977	1.5	23-May-1977	0.9	23-Jun-1977	0.5	23-Jul-1977	0.4
24-Feb-1977	8.3	24-Mar-1977	1.9	24-Apr-1977	1.5	24-May-1977	0.8	24-Jun-1977	0.5	24-Jul-1977	0.4
25-Feb-1977		25-Mar-1977	2.2	25-Apr-1977	1.4	25-May-1977	0.8	25-Jun-1977	0.5	25-Jul-1977	0.4
26-Feb-1977	4.6	26-Mar-1977	1.9	26-Apr-1977	1.4	26-May-1977	0.7	26-Jun-1977	0.5	26-Jul-1977	0.4
27-Feb-1977	3.6	27-Mar-1977		27-Apr-1977	1.4	27-May-1977	0.7	27-Jun-1977	0.5	27-Jul-1977	0.3
28-Feb-1977	3.5	28-Mar-1977	1.7	28-Apr-1977	2.1	28-May-1977	0.7	28-Jun-1977	0.5	28-Jul-1977	0.3
		29-Mar-1977	1.8	29-Apr-1977	1.7	29-May-1977	0.7	29-Jun-1977	0.5	29-Jul-1977	0.3
		30-Mar-1977	2.1	30-Apr-1977	1.6	30-May-1977	0.7	30-Jun-1977	0.6	30-Jul-1977	0.4
		31-Mar-1977	2.3	31-May-1977				31-Jul-1977	0.4		

**Débits observés Qobs d'août 1977 à juillet 1978 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Aug-1977	0.4	1-Sep-1977	0.3	1-Oct-1977	0.2	1-Nov-1977	0.1	1-Dec-1977	0.5	1-Jan-1978	6.1
2-Aug-1977	0.3	2-Sep-1977	0.4	2-Oct-1977	0.2	2-Nov-1977	0.1	2-Dec-1977	1.6	2-Jan-1978	
3-Aug-1977	0.4	3-Sep-1977	0.3	3-Oct-1977	0.3	3-Nov-1977	0.9	3-Dec-1977	0.7	3-Jan-1978	2.2
4-Aug-1977	0.3	4-Sep-1977	0.3	4-Oct-1977	0.2	4-Nov-1977	0.3	4-Dec-1977	0.5	4-Jan-1978	2.0
5-Aug-1977	0.3	5-Sep-1977	0.3	5-Oct-1977	0.2	5-Nov-1977	0.3	5-Dec-1977	0.5	5-Jan-1978	1.9
6-Aug-1977	0.3	6-Sep-1977	0.3	6-Oct-1977	0.2	6-Nov-1977		6-Dec-1977	0.8	6-Jan-1978	1.9
7-Aug-1977	0.3	7-Sep-1977	0.3	7-Oct-1977	0.1	7-Nov-1977	0.2	7-Dec-1977	1.4	7-Jan-1978	2.5
8-Aug-1977	0.3	8-Sep-1977	0.3	8-Oct-1977	0.1	8-Nov-1977	0.3	8-Dec-1977	0.6	8-Jan-1978	4.2
9-Aug-1977	0.3	9-Sep-1977	0.3	9-Oct-1977	0.1	9-Nov-1977	0.7	9-Dec-1977	0.6	9-Jan-1978	3.2
10-Aug-1977	0.3	10-Sep-1977	0.3	10-Oct-1977	0.4	10-Nov-1977	0.5	10-Dec-1977	0.5	10-Jan-1978	3.2
11-Aug-1977	0.3	11-Sep-1977	0.3	11-Oct-1977	0.4	11-Nov-1977	0.5	11-Dec-1977	0.5	11-Jan-1978	3.7
12-Aug-1977	0.5	12-Sep-1977	0.3	12-Oct-1977	0.4	12-Nov-1977	0.4	12-Dec-1977	2.4	12-Jan-1978	4.5
13-Aug-1977	0.3	13-Sep-1977	0.3	13-Oct-1977	0.3	13-Nov-1977	0.4	13-Dec-1977	0.7	13-Jan-1978	3.5
14-Aug-1977	0.3	14-Sep-1977	0.2	14-Oct-1977	0.3	14-Nov-1977	1.2	14-Dec-1977	0.9	14-Jan-1978	3.2
15-Aug-1977	0.3	15-Sep-1977		15-Oct-1977	0.3	15-Nov-1977	1.9	15-Dec-1977	0.7	15-Jan-1978	2.9
16-Aug-1977	0.3	16-Sep-1977	0.2	16-Oct-1977		16-Nov-1977	1.0	16-Dec-1977	1.3	16-Jan-1978	2.4
17-Aug-1977	0.3	17-Sep-1977		17-Oct-1977	0.3	17-Nov-1977	0.7	17-Dec-1977	1.0	17-Jan-1978	2.4
18-Aug-1977	0.3	18-Sep-1977	0.2	18-Oct-1977	0.3	18-Nov-1977	0.6	18-Dec-1977	1.0	18-Jan-1978	2.2
19-Aug-1977	0.3	19-Sep-1977	0.2	19-Oct-1977	0.3	19-Nov-1977	0.5	19-Dec-1977	0.8	19-Jan-1978	2.1
20-Aug-1977	0.3	20-Sep-1977	0.2	20-Oct-1977	0.2	20-Nov-1977	1.0	20-Dec-1977	1.9	20-Jan-1978	1.8
21-Aug-1977	0.3	21-Sep-1977	0.2	21-Oct-1977	0.4	21-Nov-1977		21-Dec-1977	5.6	21-Jan-1978	2.1
22-Aug-1977	0.3	22-Sep-1977	1.0	22-Oct-1977	0.4	22-Nov-1977	1.4	22-Dec-1977	4.1	22-Jan-1978	2.1
23-Aug-1977		23-Sep-1977	0.2	23-Oct-1977	0.4	23-Nov-1977	0.8	23-Dec-1977	4.7	23-Jan-1978	1.9
24-Aug-1977	0.3	24-Sep-1977	0.4	24-Oct-1977	0.4	24-Nov-1977	0.6	24-Dec-1977	3.4	24-Jan-1978	3.6
25-Aug-1977	0.3	25-Sep-1977	0.3	25-Oct-1977	0.3	25-Nov-1977	0.6	25-Dec-1977	2.7	25-Jan-1978	2.6
26-Aug-1977	0.3	26-Sep-1977	0.3	26-Oct-1977	0.3	26-Nov-1977	0.6	26-Dec-1977		26-Jan-1978	2.6
27-Aug-1977	0.3	27-Sep-1977	0.2	27-Oct-1977	0.3	27-Nov-1977	0.5	27-Dec-1977	2.5	27-Jan-1978	2.7
28-Aug-1977	0.3	28-Sep-1977	0.2	28-Oct-1977		28-Nov-1977	0.5	28-Dec-1977	1.9	28-Jan-1978	3.3
29-Aug-1977	0.3	29-Sep-1977	0.4	29-Oct-1977	0.2	29-Nov-1977	0.5	29-Dec-1977	3.4	29-Jan-1978	4.9
30-Aug-1977	0.3	30-Sep-1977	0.3	30-Oct-1977	0.2	30-Nov-1977	0.4	30-Dec-1977	2.8	30-Jan-1978	3.3
31-Aug-1977	0.3			31-Oct-1977	0.2			31-Dec-1977		31-Jan-1978	2.6

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1977 à juillet 1978 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)		
1-Feb-1978	3.0	1-Mar-1978	2.8	1-Apr-1978	3.5	1-May-1978	1.4	1-Jun-1978	0.9	1-Jul-1978	0.6
2-Feb-1978	2.4	2-Mar-1978	2.5	2-Apr-1978	3.1	2-May-1978	1.4	2-Jun-1978	0.8	2-Jul-1978	
3-Feb-1978	3.8	3-Mar-1978	2.3	3-Apr-1978	2.1	3-May-1978	1.4	3-Jun-1978	0.7	3-Jul-1978	0.5
4-Feb-1978	5.3	4-Mar-1978	2.4	4-Apr-1978	2.2	4-May-1978	1.4	4-Jun-1978	0.8	4-Jul-1978	0.6
5-Feb-1978		5-Mar-1978	2.2	5-Apr-1978	1.9	5-May-1978	1.3	5-Jun-1978	0.7	5-Jul-1978	0.6
6-Feb-1978		6-Mar-1978	2.4	6-Apr-1978	3.2	6-May-1978	1.3	6-Jun-1978	0.8	6-Jul-1978	0.6
7-Feb-1978	5.4	7-Mar-1978	2.4	7-Apr-1978	3.9	7-May-1978		7-Jun-1978	0.8	7-Jul-1978	0.6
8-Feb-1978	4.9	8-Mar-1978	2.4	8-Apr-1978	2.7	8-May-1978	1.2	8-Jun-1978	0.7	8-Jul-1978	0.6
9-Feb-1978	4.9	9-Mar-1978	3.7	9-Apr-1978	2.4	9-May-1978	1.2	9-Jun-1978	0.7	9-Jul-1978	
10-Feb-1978	5.8	10-Mar-1978	2.9	10-Apr-1978	2.6	10-May-1978	1.3	10-Jun-1978	0.8	10-Jul-1978	0.5
11-Feb-1978	4.0	11-Mar-1978	2.4	11-Apr-1978	2.3	11-May-1978	1.1	11-Jun-1978	0.7	11-Jul-1978	0.5
12-Feb-1978	3.5	12-Mar-1978	2.3	12-Apr-1978	2.0	12-May-1978	1.1	12-Jun-1978	0.7	12-Jul-1978	0.5
13-Feb-1978	3.3	13-Mar-1978	2.1	13-Apr-1978	1.9	13-May-1978	1.1	13-Jun-1978	0.7	13-Jul-1978	0.5
14-Feb-1978	3.1	14-Mar-1978	2.6	14-Apr-1978	1.8	14-May-1978	1.1	14-Jun-1978	0.8	14-Jul-1978	0.5
15-Feb-1978	2.7	15-Mar-1978	2.1	15-Apr-1978	2.9	15-May-1978	1.1	15-Jun-1978	0.7	15-Jul-1978	0.5
16-Feb-1978	3.3	16-Mar-1978	2.0	16-Apr-1978	2.8	16-May-1978	1.1	16-Jun-1978	0.7	16-Jul-1978	0.5
17-Feb-1978	2.9	17-Mar-1978	2.2	17-Apr-1978		17-May-1978	1.1	17-Jun-1978	0.6	17-Jul-1978	0.5
18-Feb-1978	3.0	18-Mar-1978	2.1	18-Apr-1978	2.5	18-May-1978	1.0	18-Jun-1978	0.7	18-Jul-1978	0.4
19-Feb-1978	3.2	19-Mar-1978	2.9	19-Apr-1978	2.0	19-May-1978	1.1	19-Jun-1978	0.7	19-Jul-1978	0.5
20-Feb-1978	5.2	20-Mar-1978	2.5	20-Apr-1978	2.1	20-May-1978	1.1	20-Jun-1978	0.7	20-Jul-1978	0.5
21-Feb-1978	3.3	21-Mar-1978	2.5	21-Apr-1978	1.8	21-May-1978	1.1	21-Jun-1978	0.6	21-Jul-1978	0.5
22-Feb-1978	2.9	22-Mar-1978	2.9	22-Apr-1978	1.8	22-May-1978		22-Jun-1978	0.6	22-Jul-1978	0.5
23-Feb-1978	3.1	23-Mar-1978	2.6	23-Apr-1978		23-May-1978	1.0	23-Jun-1978	0.6	23-Jul-1978	0.5
24-Feb-1978	4.1	24-Mar-1978		24-Apr-1978	1.9	24-May-1978	0.9	24-Jun-1978	0.6	24-Jul-1978	0.5
25-Feb-1978	3.2	25-Mar-1978	2.1	25-Apr-1978	1.9	25-May-1978	0.9	25-Jun-1978	0.6	25-Jul-1978	0.5
26-Feb-1978	3.4	26-Mar-1978	2.3	26-Apr-1978	1.8	26-May-1978	0.9	26-Jun-1978		26-Jul-1978	0.5
27-Feb-1978	3.1	27-Mar-1978	2.7	27-Apr-1978	1.6	27-May-1978	0.9	27-Jun-1978	0.6	27-Jul-1978	0.5
28-Feb-1978	3.0	28-Mar-1978	2.1	28-Apr-1978	1.6	28-May-1978	0.9	28-Jun-1978	0.5	28-Jul-1978	0.5
		29-Mar-1978	3.0	29-Apr-1978	1.7	29-May-1978	0.8	29-Jun-1978	0.6	29-Jul-1978	0.5
		30-Mar-1978	2.1	30-Apr-1978	1.5	30-May-1978	0.8	30-Jun-1978	0.5	30-Jul-1978	0.5
		31-Mar-1978	2.1			31-May-1978	0.8			31-Jul-1978	0.5

**Débits observés (Qobs) d'août 1978 à juillet 1978 - Bassin de la Tolomosa**

<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>
1-Aug-1978		1-Sep-1978	0.3	1-Oct-1978	0.2	1-Nov-1978	0.4	1-Dec-1978	0.4	1-Jan-1979	
2-Aug-1978	0.5	2-Sep-1978	0.3	2-Oct-1978		2-Nov-1978	0.3	2-Dec-1978	1.6	2-Jan-1979	2.7
3-Aug-1978	0.4	3-Sep-1978	0.3	3-Oct-1978	0.2	3-Nov-1978	0.3	3-Dec-1978	1.5	3-Jan-1979	2.6
4-Aug-1978	0.5	4-Sep-1978		4-Oct-1978	0.9	4-Nov-1978		4-Dec-1978		4-Jan-1979	2.4
5-Aug-1978	0.5	5-Sep-1978	0.3	5-Oct-1978	0.4	5-Nov-1978	0.3	5-Dec-1978	1.5	5-Jan-1979	2.2
6-Aug-1978	0.5	6-Sep-1978	0.3	6-Oct-1978	2.2	6-Nov-1978	0.2	6-Dec-1978	1.1	6-Jan-1979	4.2
7-Aug-1978	0.5	7-Sep-1978	0.3	7-Oct-1978	0.8	7-Nov-1978	0.2	7-Dec-1978	1.0	7-Jan-1979	2.7
8-Aug-1978	0.5	8-Sep-1978	0.3	8-Oct-1978	0.4	8-Nov-1978	0.3	8-Dec-1978	0.9	8-Jan-1979	2.5
9-Aug-1978	0.5	9-Sep-1978	0.3	9-Oct-1978		9-Nov-1978	0.5	9-Dec-1978	1.7	9-Jan-1979	3.3
10-Aug-1978	0.4	10-Sep-1978	0.3	10-Oct-1978	0.5	10-Nov-1978	2.2	10-Dec-1978	1.5	10-Jan-1979	2.7
11-Aug-1978	0.4	11-Sep-1978	0.3	11-Oct-1978	0.4	11-Nov-1978	0.5	11-Dec-1978	1.1	11-Jan-1979	
12-Aug-1978	0.4	12-Sep-1978	0.3	12-Oct-1978	0.3	12-Nov-1978	0.9	12-Dec-1978	0.9	12-Jan-1979	4.2
13-Aug-1978	0.4	13-Sep-1978	0.3	13-Oct-1978	0.4	13-Nov-1978	3.3	13-Dec-1978	0.9	13-Jan-1979	3.3
14-Aug-1978	0.4	14-Sep-1978	0.3	14-Oct-1978	0.3	14-Nov-1978	1.5	14-Dec-1978	3.1	14-Jan-1979	4.1
15-Aug-1978	0.4	15-Sep-1978	0.3	15-Oct-1978	0.3	15-Nov-1978	0.7	15-Dec-1978	1.5	15-Jan-1979	3.4
16-Aug-1978	0.3	16-Sep-1978	0.3	16-Oct-1978	0.3	16-Nov-1978	0.4	16-Dec-1978	1.8	16-Jan-1979	2.7
17-Aug-1978	0.4	17-Sep-1978	0.3	17-Oct-1978		17-Nov-1978	0.4	17-Dec-1978		17-Jan-1979	2.5
18-Aug-1978	0.3	18-Sep-1978	0.3	18-Oct-1978	0.3	18-Nov-1978	0.4	18-Dec-1978	2.8	18-Jan-1979	2.4
19-Aug-1978	0.4	19-Sep-1978	0.5	19-Oct-1978	0.2	19-Nov-1978	0.4	19-Dec-1978	4.3	19-Jan-1979	2.2
20-Aug-1978	0.4	20-Sep-1978	0.4	20-Oct-1978	0.2	20-Nov-1978		20-Dec-1978		20-Jan-1979	2.1
21-Aug-1978	0.4	21-Sep-1978	0.3	21-Oct-1978	0.2	21-Nov-1978	1.5	21-Dec-1978	3.9	21-Jan-1979	3.6
22-Aug-1978	0.4	22-Sep-1978		22-Oct-1978	0.2	22-Nov-1978	0.6	22-Dec-1978	3.3	22-Jan-1979	
23-Aug-1978	0.4	23-Sep-1978	0.3	23-Oct-1978	0.2	23-Nov-1978	0.7	23-Dec-1978	2.9	23-Jan-1979	6.0
24-Aug-1978		24-Sep-1978	0.3	24-Oct-1978	0.2	24-Nov-1978	0.6	24-Dec-1978	2.4	24-Jan-1979	6.9
25-Aug-1978	0.4	25-Sep-1978	0.3	25-Oct-1978	0.2	25-Nov-1978	0.5	25-Dec-1978		25-Jan-1979	4.1
26-Aug-1978	0.4	26-Sep-1978	0.3	26-Oct-1978	0.2	26-Nov-1978	0.5	26-Dec-1978	5.6	26-Jan-1979	5.2
27-Aug-1978	0.4	27-Sep-1978	0.3	27-Oct-1978	0.6	27-Nov-1978	0.4	27-Dec-1978	4.7	27-Jan-1979	4.2
28-Aug-1978	0.3	28-Sep-1978	0.3	28-Oct-1978	0.3	28-Nov-1978	0.4	28-Dec-1978	3.4	28-Jan-1979	
29-Aug-1978	0.4	29-Sep-1978	0.2	29-Oct-1978	0.2	29-Nov-1978	0.4	29-Dec-1978	3.0	29-Jan-1979	
30-Aug-1978	0.3	30-Sep-1978	0.2	30-Oct-1978	0.3	30-Nov-1978	0.4	30-Dec-1978	3.5	30-Jan-1979	
31-Aug-1978	0.3			31-Oct-1978	0.5			31-Dec-1978	3.2	31-Jan-1979	

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1978 à juillet 1979 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Feb-1979		1-Mar-1979		1-Apr-1979		1-May-1979	1.5	1-Jun-1979	0.8
2-Feb-1979		2-Mar-1979	4.1	2-Apr-1979	5.2	2-May-1979	1.5	2-Jun-1979	0.8
3-Feb-1979		3-Mar-1979	3.3	3-Apr-1979	4.6	3-May-1979		3-Jun-1979	0.8
4-Feb-1979		4-Mar-1979		4-Apr-1979	4.4	4-May-1979	1.4	4-Jun-1979	
5-Feb-1979		5-Mar-1979	2.6	5-Apr-1979	3.9	5-May-1979	1.4	5-Jun-1979	0.8
6-Feb-1979		6-Mar-1979	2.7	6-Apr-1979	3.9	6-May-1979	1.3	6-Jun-1979	0.8
7-Feb-1979		7-Mar-1979	5.1	7-Apr-1979	3.5	7-May-1979	1.5	7-Jun-1979	0.8
8-Feb-1979		8-Mar-1979	4.2	8-Apr-1979	3.3	8-May-1979	1.4	8-Jun-1979	
9-Feb-1979		9-Mar-1979	4.4	9-Apr-1979	3.2	9-May-1979	1.4	9-Jun-1979	
10-Feb-1979		10-Mar-1979	4.7	10-Apr-1979	3.1	10-May-1979	1.3	10-Jun-1979	0.7
11-Feb-1979		11-Mar-1979	5.4	11-Apr-1979	2.7	11-May-1979	1.3	11-Jun-1979	0.7
12-Feb-1979		12-Mar-1979	5.9	12-Apr-1979	2.7	12-May-1979	1.3	12-Jun-1979	0.8
13-Feb-1979	7.2	13-Mar-1979	6.6	13-Apr-1979	2.8	13-May-1979	1.2	13-Jun-1979	0.7
14-Feb-1979	8.2	14-Mar-1979	8.4	14-Apr-1979	2.3	14-May-1979	1.2	14-Jun-1979	0.7
15-Feb-1979	5.4	15-Mar-1979	7.9	15-Apr-1979		15-May-1979	1.1	15-Jun-1979	0.7
16-Feb-1979	6.2	16-Mar-1979	7.1	16-Apr-1979	2.0	16-May-1979	1.1	16-Jun-1979	0.7
17-Feb-1979	5.0	17-Mar-1979		17-Apr-1979	2.0	17-May-1979	1.1	17-Jun-1979	0.7
18-Feb-1979	4.2	18-Mar-1979		18-Apr-1979	2.0	18-May-1979	1.1	18-Jun-1979	0.7
19-Feb-1979	3.4	19-Mar-1979		19-Apr-1979	1.8	19-May-1979	1.1	19-Jun-1979	
20-Feb-1979		20-Mar-1979		20-Apr-1979	1.8	20-May-1979	1.1	20-Jun-1979	0.6
21-Feb-1979	4.1	21-Mar-1979	4.9	21-Apr-1979	1.8	21-May-1979	1.0	21-Jun-1979	0.7
22-Feb-1979	4.0	22-Mar-1979	4.4	22-Apr-1979	1.8	22-May-1979		22-Jun-1979	0.6
23-Feb-1979	3.5	23-Mar-1979	4.6	23-Apr-1979	1.9	23-May-1979	1.0	23-Jun-1979	0.6
24-Feb-1979	3.3	24-Mar-1979	5.3	24-Apr-1979	2.0	24-May-1979	0.9	24-Jun-1979	0.6
25-Feb-1979	3.0	25-Mar-1979	4.4	25-Apr-1979	2.0	25-May-1979	0.9	25-Jun-1979	0.5
26-Feb-1979	3.1	26-Mar-1979	4.0	26-Apr-1979	1.9	26-May-1979	0.9	26-Jun-1979	0.6
27-Feb-1979	3.2	27-Mar-1979	5.0	27-Apr-1979	1.8	27-May-1979	0.9	27-Jun-1979	0.5
28-Feb-1979		28-Mar-1979		28-Apr-1979	1.9	28-May-1979	0.8	28-Jun-1979	0.6
		29-Mar-1979	6.6	29-Apr-1979	1.6	29-May-1979	0.8	29-Jun-1979	0.5
		30-Mar-1979	7.4	30-Apr-1979	1.6	30-May-1979	0.8	30-Jun-1979	0.5
		31-Mar-1979	7.3	31-May-1979	0.8			31-Jul-1979	0.4

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1979 à juillet 1980 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Aug-1979		1-Sep-1979	0.3	1-Oct-1979	0.2	1-Nov-1979	0.1	1-Dec-1979	0.4
2-Aug-1979		2-Sep-1979	0.3	2-Oct-1979		2-Nov-1979	0.1	2-Dec-1979	0.3
3-Aug-1979	0.4	3-Sep-1979	0.2	3-Oct-1979	0.2	3-Nov-1979	0.1	3-Dec-1979	0.3
4-Aug-1979	0.3	4-Sep-1979	0.3	4-Oct-1979	0.2	4-Nov-1979	0.1	4-Dec-1979	0.3
5-Aug-1979	0.4	5-Sep-1979		5-Oct-1979	0.2	5-Nov-1979	1.1	5-Dec-1979	0.3
6-Aug-1979	0.3	6-Sep-1979	0.3	6-Oct-1979	0.2	6-Nov-1979		6-Dec-1979	0.3
7-Aug-1979		7-Sep-1979	0.3	7-Oct-1979	0.2	7-Nov-1979	0.5	7-Dec-1979	0.3
8-Aug-1979	0.4	8-Sep-1979	0.3	8-Oct-1979	0.1	8-Nov-1979	0.7	8-Dec-1979	0.2
9-Aug-1979	0.3	9-Sep-1979	0.2	9-Oct-1979	0.1	9-Nov-1979		9-Dec-1979	0.2
10-Aug-1979	0.3	10-Sep-1979	0.2	10-Oct-1979	0.1	10-Nov-1979	0.5	10-Dec-1979	0.2
11-Aug-1979	1.0	11-Sep-1979	0.2	11-Oct-1979	0.2	11-Nov-1979	0.3	11-Dec-1979	0.6
12-Aug-1979	0.7	12-Sep-1979	0.2	12-Oct-1979	0.1	12-Nov-1979	0.4	12-Dec-1979	
13-Aug-1979	0.4	13-Sep-1979	0.3	13-Oct-1979	0.2	13-Nov-1979	0.3	13-Dec-1979	1.4
14-Aug-1979	0.4	14-Sep-1979	0.3	14-Oct-1979	0.5	14-Nov-1979	0.3	14-Dec-1979	1.7
15-Aug-1979	0.4	15-Sep-1979	0.2	15-Oct-1979	0.4	15-Nov-1979	0.3	15-Dec-1979	0.4
16-Aug-1979	0.4	16-Sep-1979	0.2	16-Oct-1979	0.4	16-Nov-1979	0.3	16-Dec-1979	1.6
17-Aug-1979	0.4	17-Sep-1979	0.2	17-Oct-1979		17-Nov-1979	0.4	17-Dec-1979	0.5
18-Aug-1979	0.4	18-Sep-1979	0.3	18-Oct-1979	0.3	18-Nov-1979	0.3	18-Dec-1979	0.5
19-Aug-1979	0.4	19-Sep-1979	0.3	19-Oct-1979	0.3	19-Nov-1979	0.3	19-Dec-1979	0.4
20-Aug-1979	0.4	20-Sep-1979	0.3	20-Oct-1979	0.3	20-Nov-1979	0.3	20-Dec-1979	0.4
21-Aug-1979	0.4	21-Sep-1979	0.3	21-Oct-1979	0.2	21-Nov-1979	0.3	21-Dec-1979	0.6
22-Aug-1979		22-Sep-1979	0.2	22-Oct-1979	0.2	22-Nov-1979	0.2	22-Dec-1979	
23-Aug-1979	0.3	23-Sep-1979	0.3	23-Oct-1979	0.1	23-Nov-1979	0.2	23-Dec-1979	2.2
24-Aug-1979	0.3	24-Sep-1979		24-Oct-1979	0.2	24-Nov-1979	0.3	24-Dec-1979	2.6
25-Aug-1979	0.3	25-Sep-1979	0.2	25-Oct-1979	0.1	25-Nov-1979	0.6	25-Dec-1979	4.1
26-Aug-1979	0.3	26-Sep-1979	0.2	26-Oct-1979	0.1	26-Nov-1979		26-Dec-1979	2.6
27-Aug-1979	0.3	27-Sep-1979	0.2	27-Oct-1979	0.9	27-Nov-1979	0.5	27-Dec-1979	
28-Aug-1979	0.3	28-Sep-1979	0.2	28-Oct-1979	0.2	28-Nov-1979	0.4	28-Dec-1979	
29-Aug-1979	0.3	29-Sep-1979	0.2	29-Oct-1979	0.2	29-Nov-1979	0.4	29-Dec-1979	
30-Aug-1979	0.3	30-Sep-1979	0.2	30-Oct-1979	0.2	30-Nov-1979	0.4	30-Dec-1979	
31-Aug-1979	0.3			31-Oct-1979	0.1			31-Dec-1979	
								1-Jan-1980	
								2-Jan-1980	
								3-Jan-1980	
								4-Jan-1980	
								5-Jan-1980	
								6-Jan-1980	
								7-Jan-1980	
								8-Jan-1980	
								9-Jan-1980	
								10-Jan-1980	
								11-Jan-1980	
								12-Jan-1980	
								13-Jan-1980	
								14-Jan-1980	
								15-Jan-1980	
								16-Jan-1980	
								17-Jan-1980	
								18-Jan-1980	
								19-Jan-1980	
								20-Jan-1980	
								21-Jan-1980	
								22-Jan-1980	
								23-Jan-1980	
								24-Jan-1980	
								25-Jan-1980	
								26-Jan-1980	
								27-Jan-1980	
								28-Jan-1980	
								29-Jan-1980	
								30-Jan-1980	
								31-Jan-1980	

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1979 à juillet 1980 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Feb-1980		1-Mar-1980	3.4	1-Apr-1980	3.9	1-May-1980	1.2	1-Jun-1980	0.7
2-Feb-1980	5.1	2-Mar-1980	3.5	2-Apr-1980		2-May-1980		2-Jun-1980	0.6
3-Feb-1980	4.6	3-Mar-1980	5.8	3-Apr-1980	3.7	3-May-1980	1.2	3-Jun-1980	0.6
4-Feb-1980	4.1	4-Mar-1980	6.1	4-Apr-1980	3.0	4-May-1980	1.1	4-Jun-1980	
5-Feb-1980	4.7	5-Mar-1980	5.5	5-Apr-1980	3.4	5-May-1980	1.1	5-Jun-1980	0.6
6-Feb-1980		6-Mar-1980	4.5	6-Apr-1980	2.9	6-May-1980	1.0	6-Jun-1980	0.6
7-Feb-1980	3.4	7-Mar-1980	4.0	7-Apr-1980	2.9	7-May-1980	1.0	7-Jun-1980	0.6
8-Feb-1980	3.2	8-Mar-1980		8-Apr-1980	2.8	8-May-1980	1.0	8-Jun-1980	0.6
9-Feb-1980	2.9	9-Mar-1980	9.4	9-Apr-1980	2.5	9-May-1980	1.1	9-Jun-1980	0.6
10-Feb-1980	2.8	10-Mar-1980	7.0	10-Apr-1980	2.5	10-May-1980	1.0	10-Jun-1980	0.6
11-Feb-1980	2.6	11-Mar-1980	6.5	11-Apr-1980	2.3	11-May-1980	1.0	11-Jun-1980	0.6
12-Feb-1980	2.7	12-Mar-1980	14.2	12-Apr-1980	2.0	12-May-1980	0.9	12-Jun-1980	0.6
13-Feb-1980	2.4	13-Mar-1980	11.4	13-Apr-1980	2.0	13-May-1980	1.0	13-Jun-1980	0.6
14-Feb-1980	2.2	14-Mar-1980		14-Apr-1980	1.9	14-May-1980	0.8	14-Jun-1980	0.5
15-Feb-1980	2.3	15-Mar-1980	9.2	15-Apr-1980	1.8	15-May-1980	0.9	15-Jun-1980	0.5
16-Feb-1980	2.2	16-Mar-1980	8.8	16-Apr-1980	1.8	16-May-1980	0.8	16-Jun-1980	0.5
17-Feb-1980	4.2	17-Mar-1980	10.3	17-Apr-1980	1.7	17-May-1980	0.8	17-Jun-1980	0.5
18-Feb-1980	3.2	18-Mar-1980	11.2	18-Apr-1980	1.6	18-May-1980	1.0	18-Jun-1980	0.5
19-Feb-1980	2.8	19-Mar-1980	7.2	19-Apr-1980	1.4	19-May-1980	0.9	19-Jun-1980	0.5
20-Feb-1980		20-Mar-1980	5.7	20-Apr-1980	1.3	20-May-1980	0.8	20-Jun-1980	0.5
21-Feb-1980		21-Mar-1980	5.1	21-Apr-1980		21-May-1980	0.8	21-Jun-1980	0.5
22-Feb-1980	4.7	22-Mar-1980	4.8	22-Apr-1980	1.3	22-May-1980	0.8	22-Jun-1980	0.5
23-Feb-1980	4.2	23-Mar-1980	4.2	23-Apr-1980	1.4	23-May-1980	0.7	23-Jun-1980	0.4
24-Feb-1980	3.2	24-Mar-1980	4.1	24-Apr-1980	1.3	24-May-1980	0.7	24-Jun-1980	0.5
25-Feb-1980	3.0	25-Mar-1980	3.8	25-Apr-1980	1.3	25-May-1980	0.8	25-Jun-1980	
26-Feb-1980	5.4	26-Mar-1980	4.0	26-Apr-1980	1.2	26-May-1980	0.7	26-Jun-1980	0.5
27-Feb-1980	6.0	27-Mar-1980		27-Apr-1980	1.2	27-May-1980		27-Jun-1980	0.5
28-Feb-1980	4.6	28-Mar-1980	4.9	28-Apr-1980	1.2	28-May-1980		28-Jun-1980	0.5
29-Feb-1980	4.0	29-Mar-1980	3.6	29-Apr-1980	1.2	29-May-1980		29-Jun-1980	0.4
		30-Mar-1980	3.1	30-Apr-1980	1.1	30-May-1980	0.7	30-Jun-1980	
		31-Mar-1980	3.8			31-May-1980	0.7	31-Jul-1980	0.3

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1980 à juillet 1981 - Bassin de la Tolomosa**

<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>	<b>Date</b>	<b>Q<sub>obs</sub> (mm)</b>
1-Aug-1980	0.3	1-Sep-1980	0.2	1-Oct-1980	0.1	1-Nov-1980		1-Dec-1980	0.3
2-Aug-1980	0.3	2-Sep-1980		2-Oct-1980		2-Nov-1980	0.3	2-Dec-1980	
3-Aug-1980	0.3	3-Sep-1980	0.2	3-Oct-1980	0.1	3-Nov-1980		3-Dec-1980	0.2
4-Aug-1980	0.3	4-Sep-1980		4-Oct-1980		4-Nov-1980	0.3	4-Dec-1980	
5-Aug-1980	0.3	5-Sep-1980	0.2	5-Oct-1980	0.1	5-Nov-1980		5-Dec-1980	1.7
6-Aug-1980	0.3	6-Sep-1980		6-Oct-1980		6-Nov-1980	0.2	6-Dec-1980	1.0
7-Aug-1980	0.3	7-Sep-1980	0.2	7-Oct-1980	0.1	7-Nov-1980		7-Dec-1980	0.6
8-Aug-1980	0.3	8-Sep-1980		8-Oct-1980		8-Nov-1980	0.2	8-Dec-1980	0.3
9-Aug-1980	0.3	9-Sep-1980	0.2	9-Oct-1980	0.1	9-Nov-1980		9-Dec-1980	0.3
10-Aug-1980	0.3	10-Sep-1980		10-Oct-1980		10-Nov-1980	0.2	10-Dec-1980	0.5
11-Aug-1980	0.3	11-Sep-1980	0.2	11-Oct-1980	0.1	11-Nov-1980		11-Dec-1980	0.6
12-Aug-1980	0.3	12-Sep-1980		12-Oct-1980		12-Nov-1980	0.1	12-Dec-1980	
13-Aug-1980	0.3	13-Sep-1980	0.2	13-Oct-1980	0.1	13-Nov-1980		13-Dec-1980	0.3
14-Aug-1980	0.3	14-Sep-1980		14-Oct-1980		14-Nov-1980	0.1	14-Dec-1980	0.4
15-Aug-1980	0.3	15-Sep-1980	0.2	15-Oct-1980	0.1	15-Nov-1980		15-Dec-1980	0.3
16-Aug-1980	0.3	16-Sep-1980		16-Oct-1980		16-Nov-1980	0.1	16-Dec-1980	0.3
17-Aug-1980	0.3	17-Sep-1980	0.2	17-Oct-1980	0.1	17-Nov-1980		17-Dec-1980	0.2
18-Aug-1980	0.2	18-Sep-1980		18-Oct-1980		18-Nov-1980	0.3	18-Dec-1980	0.2
19-Aug-1980		19-Sep-1980	0.2	19-Oct-1980	0.8	19-Nov-1980		19-Dec-1980	0.8
20-Aug-1980	0.3	20-Sep-1980		20-Oct-1980		20-Nov-1980	0.2	20-Dec-1980	0.3
21-Aug-1980	0.2	21-Sep-1980	0.1	21-Oct-1980	0.4	21-Nov-1980		21-Dec-1980	0.2
22-Aug-1980	0.2	22-Sep-1980		22-Oct-1980		22-Nov-1980	0.2	22-Dec-1980	0.2
23-Aug-1980	0.2	23-Sep-1980	0.2	23-Oct-1980	0.5	23-Nov-1980		23-Dec-1980	
24-Aug-1980	0.3	24-Sep-1980		24-Oct-1980		24-Nov-1980	0.4	24-Dec-1980	1.1
25-Aug-1980	0.3	25-Sep-1980	0.2	25-Oct-1980	0.3	25-Nov-1980		25-Dec-1980	0.3
26-Aug-1980	0.3	26-Sep-1980		26-Oct-1980		26-Nov-1980	0.2	26-Dec-1980	
27-Aug-1980	0.3	27-Sep-1980	0.1	27-Oct-1980	0.4	27-Nov-1980		27-Dec-1980	0.4
28-Aug-1980	0.2	28-Sep-1980		28-Oct-1980		28-Nov-1980	0.4	28-Dec-1980	0.5
29-Aug-1980	0.2	29-Sep-1980	0.1	29-Oct-1980	0.4	29-Nov-1980		29-Dec-1980	0.5
30-Aug-1980	0.2	30-Sep-1980		30-Oct-1980		30-Nov-1980	0.2	30-Dec-1980	0.3
31-Aug-1980	0.2			31-Oct-1980	0.5			31-Dec-1980	0.3
								1-Jan-1981	0.6
								2-Jan-1981	
								3-Jan-1981	0.9
								4-Jan-1981	0.7
								5-Jan-1981	0.7
								6-Jan-1981	0.6
								7-Jan-1981	1.2
								8-Jan-1981	0.8
								9-Jan-1981	3.8
								10-Jan-1981	2.1
								11-Jan-1981	1.8
								12-Jan-1981	
								13-Jan-1981	1.6
								14-Jan-1981	2.0
								15-Jan-1981	1.5
								16-Jan-1981	1.6
								17-Jan-1981	1.4
								18-Jan-1981	1.9
								19-Jan-1981	
								20-Jan-1981	1.3
								21-Jan-1981	1.9
								22-Jan-1981	2.2
								23-Jan-1981	2.2
								24-Jan-1981	3.5
								25-Jan-1981	5.1
								26-Jan-1981	3.9
								27-Jan-1981	3.0
								28-Jan-1981	4.5
								29-Jan-1981	
								30-Jan-1981	4.9
								31-Jan-1981	3.5

**Débits observés (Qobs) d'août 1980 à juillet 1981 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Feb-1981		1-Mar-1981	3.3	1-Apr-1981		1-May-1981		1-Jun-1981	0.7
2-Feb-1981	3.2	2-Mar-1981	3.9	2-Apr-1981	1.7	2-May-1981	1.2	2-Jun-1981	0.7
3-Feb-1981	4.2	3-Mar-1981	3.6	3-Apr-1981	1.7	3-May-1981	1.2	3-Jun-1981	0.7
4-Feb-1981		4-Mar-1981	3.3	4-Apr-1981	1.6	4-May-1981	1.2	4-Jun-1981	0.7
5-Feb-1981		5-Mar-1981	3.1	5-Apr-1981	1.6	5-May-1981	1.1	5-Jun-1981	0.7
6-Feb-1981		6-Mar-1981	3.6	6-Apr-1981	1.5	6-May-1981	1.1	6-Jun-1981	
7-Feb-1981	5.3	7-Mar-1981		7-Apr-1981	1.4	7-May-1981	1.1	7-Jun-1981	0.6
8-Feb-1981	5.3	8-Mar-1981		8-Apr-1981	1.5	8-May-1981	1.0	8-Jun-1981	0.6
9-Feb-1981	4.9	9-Mar-1981	3.4	9-Apr-1981	2.1	9-May-1981	1.1	9-Jun-1981	0.6
10-Feb-1981		10-Mar-1981	3.0	10-Apr-1981	2.1	10-May-1981	1.1	10-Jun-1981	0.6
11-Feb-1981		11-Mar-1981	2.8	11-Apr-1981	2.9	11-May-1981	1.0	11-Jun-1981	0.6
12-Feb-1981	5.7	12-Mar-1981	3.1	12-Apr-1981	2.0	12-May-1981	1.0	12-Jun-1981	0.6
13-Feb-1981	5.3	13-Mar-1981		13-Apr-1981	2.1	13-May-1981	1.0	13-Jun-1981	0.6
14-Feb-1981	5.1	14-Mar-1981	2.2	14-Apr-1981	2.0	14-May-1981	1.0	14-Jun-1981	0.6
15-Feb-1981	4.9	15-Mar-1981	2.3	15-Apr-1981	2.7	15-May-1981	0.9	15-Jun-1981	0.6
16-Feb-1981	4.9	16-Mar-1981		16-Apr-1981	2.1	16-May-1981	1.0	16-Jun-1981	0.6
17-Feb-1981	4.2	17-Mar-1981	2.3	17-Apr-1981		17-May-1981	0.9	17-Jun-1981	0.6
18-Feb-1981	4.1	18-Mar-1981	2.2	18-Apr-1981	1.9	18-May-1981	1.0	18-Jun-1981	0.5
19-Feb-1981	4.4	19-Mar-1981	2.1	19-Apr-1981	2.0	19-May-1981		19-Jun-1981	0.5
20-Feb-1981		20-Mar-1981		20-Apr-1981	1.8	20-May-1981	0.9	20-Jun-1981	0.5
21-Feb-1981	5.5	21-Mar-1981	3.3	21-Apr-1981	1.7	21-May-1981	0.9	21-Jun-1981	0.5
22-Feb-1981	4.6	22-Mar-1981	3.2	22-Apr-1981	1.6	22-May-1981	0.9	22-Jun-1981	0.5
23-Feb-1981	4.3	23-Mar-1981	2.9	23-Apr-1981	1.6	23-May-1981	0.8	23-Jun-1981	
24-Feb-1981	3.9	24-Mar-1981	2.3	24-Apr-1981	1.6	24-May-1981	0.8	24-Jun-1981	0.5
25-Feb-1981	3.3	25-Mar-1981	2.2	25-Apr-1981	1.4	25-May-1981	0.8	25-Jun-1981	0.5
26-Feb-1981	3.5	26-Mar-1981	2.1	26-Apr-1981	1.5	26-May-1981	0.8	26-Jun-1981	0.4
27-Feb-1981	3.6	27-Mar-1981	2.0	27-Apr-1981	1.4	27-May-1981	0.8	27-Jun-1981	0.4
28-Feb-1981	3.7	28-Mar-1981	2.1	28-Apr-1981	1.3	28-May-1981	0.8	28-Jun-1981	0.5
		29-Mar-1981	2.0	29-Apr-1981	1.3	29-May-1981	0.7	29-Jun-1981	0.5
		30-Mar-1981	1.8	30-Apr-1981	1.2	30-May-1981	0.7	30-Jun-1981	0.4
		31-Mar-1981	1.9			31-May-1981	0.7	31-Jul-1981	0.4

**Débits observés (Qobs) d'août 1981 à juillet 1982 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Aug-1981	0.4	1-Sep-1981	0.3	1-Oct-1981		1-Nov-1981	0.3	1-Dec-1981	0.5	1-Jan-1982	
2-Aug-1981		2-Sep-1981		2-Oct-1981	0.2	2-Nov-1981	0.5	2-Dec-1981	0.5	2-Jan-1982	
3-Aug-1981	0.4	3-Sep-1981	0.3	3-Oct-1981		3-Nov-1981		3-Dec-1981	0.5	3-Jan-1982	
4-Aug-1981		4-Sep-1981		4-Oct-1981	0.2	4-Nov-1981		4-Dec-1981	0.5	4-Jan-1982	2.6
5-Aug-1981	0.4	5-Sep-1981	0.3	5-Oct-1981		5-Nov-1981	0.3	5-Dec-1981	0.5	5-Jan-1982	2.4
6-Aug-1981		6-Sep-1981		6-Oct-1981	0.2	6-Nov-1981	0.2	6-Dec-1981	0.4	6-Jan-1982	2.8
7-Aug-1981	0.4	7-Sep-1981	0.3	7-Oct-1981		7-Nov-1981	0.3	7-Dec-1981	1.3	7-Jan-1982	3.2
8-Aug-1981		8-Sep-1981		8-Oct-1981	0.2	8-Nov-1981	0.2	8-Dec-1981	1.4	8-Jan-1982	2.9
9-Aug-1981	0.3	9-Sep-1981	0.3	9-Oct-1981		9-Nov-1981		9-Dec-1981	0.8	9-Jan-1982	
10-Aug-1981		10-Sep-1981		10-Oct-1981	0.2	10-Nov-1981	0.3	10-Dec-1981	0.7	10-Jan-1982	3.5
11-Aug-1981	0.4	11-Sep-1981	0.3	11-Oct-1981		11-Nov-1981	1.4	11-Dec-1981	1.3	11-Jan-1982	
12-Aug-1981		12-Sep-1981		12-Oct-1981	0.2	12-Nov-1981	2.7	12-Dec-1981		12-Jan-1982	4.7
13-Aug-1981	0.3	13-Sep-1981	0.3	13-Oct-1981		13-Nov-1981	2.6	13-Dec-1981	5.0	13-Jan-1982	3.5
14-Aug-1981		14-Sep-1981		14-Oct-1981	0.2	14-Nov-1981	1.3	14-Dec-1981		14-Jan-1982	
15-Aug-1981	0.3	15-Sep-1981	0.3	15-Oct-1981		15-Nov-1981	1.1	15-Dec-1981	1.3	15-Jan-1982	4.5
16-Aug-1981		16-Sep-1981		16-Oct-1981	0.2	16-Nov-1981	0.5	16-Dec-1981	1.4	16-Jan-1982	3.7
17-Aug-1981	0.3	17-Sep-1981	0.3	17-Oct-1981		17-Nov-1981	0.5	17-Dec-1981	1.2	17-Jan-1982	
18-Aug-1981		18-Sep-1981		18-Oct-1981	0.1	18-Nov-1981	0.4	18-Dec-1981	1.0	18-Jan-1982	
19-Aug-1981	0.3	19-Sep-1981	0.3	19-Oct-1981		19-Nov-1981	0.4	19-Dec-1981	1.1	19-Jan-1982	
20-Aug-1981		20-Sep-1981		20-Oct-1981	0.2	20-Nov-1981	0.4	20-Dec-1981	1.0	20-Jan-1982	4.9
21-Aug-1981	0.3	21-Sep-1981	0.3	21-Oct-1981		21-Nov-1981	0.4	21-Dec-1981	1.1	21-Jan-1982	4.9
22-Aug-1981		22-Sep-1981		22-Oct-1981	0.3	22-Nov-1981	0.4	22-Dec-1981	1.1	22-Jan-1982	
23-Aug-1981	0.3	23-Sep-1981	0.3	23-Oct-1981		23-Nov-1981	0.5	23-Dec-1981	1.1	23-Jan-1982	4.0
24-Aug-1981		24-Sep-1981		24-Oct-1981	0.2	24-Nov-1981	0.5	24-Dec-1981	1.1	24-Jan-1982	3.6
25-Aug-1981	0.3	25-Sep-1981	0.3	25-Oct-1981		25-Nov-1981	0.7	25-Dec-1981	1.0	25-Jan-1982	3.3
26-Aug-1981		26-Sep-1981		26-Oct-1981	0.2	26-Nov-1981	1.2	26-Dec-1981	1.0	26-Jan-1982	3.0
27-Aug-1981	0.3	27-Sep-1981	0.3	27-Oct-1981		27-Nov-1981	0.5	27-Dec-1981	1.0	27-Jan-1982	3.2
28-Aug-1981		28-Sep-1981		28-Oct-1981	0.4	28-Nov-1981	0.9	28-Dec-1981	3.1	28-Jan-1982	2.9
29-Aug-1981	0.3	29-Sep-1981		29-Oct-1981		29-Nov-1981	0.8	29-Dec-1981		29-Jan-1982	2.9
30-Aug-1981		30-Sep-1981	0.3	30-Oct-1981	0.3	30-Nov-1981	0.5	30-Dec-1981		30-Jan-1982	2.8
31-Aug-1981	0.3			31-Oct-1981	0.8			31-Dec-1981		31-Jan-1982	4.2

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1981 à juillet 1982 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)		
1-Feb-1982	3.7	1-Mar-1982		1-Apr-1982	2.6	1-May-1982	1.9	1-Jun-1982		1-Jul-1982	0.6
2-Feb-1982	2.6	2-Mar-1982		2-Apr-1982	2.6	2-May-1982		2-Jun-1982		2-Jul-1982	
3-Feb-1982	2.6	3-Mar-1982		3-Apr-1982	2.4	3-May-1982	1.8	3-Jun-1982		3-Jul-1982	0.5
4-Feb-1982		4-Mar-1982		4-Apr-1982	2.3	4-May-1982		4-Jun-1982		4-Jul-1982	
5-Feb-1982		5-Mar-1982		5-Apr-1982	2.8	5-May-1982	1.7	5-Jun-1982	0.9	5-Jul-1982	0.5
6-Feb-1982	3.9	6-Mar-1982		6-Apr-1982	2.4	6-May-1982		6-Jun-1982		6-Jul-1982	
7-Feb-1982	3.7	7-Mar-1982		7-Apr-1982	2.4	7-May-1982	1.6	7-Jun-1982	0.8	7-Jul-1982	0.5
8-Feb-1982	4.6	8-Mar-1982		8-Apr-1982		8-May-1982		8-Jun-1982		8-Jul-1982	
9-Feb-1982	3.5	9-Mar-1982		9-Apr-1982	3.3	9-May-1982	1.7	9-Jun-1982	0.8	9-Jul-1982	0.5
10-Feb-1982	3.4	10-Mar-1982		10-Apr-1982	2.6	10-May-1982		10-Jun-1982		10-Jul-1982	
11-Feb-1982	3.0	11-Mar-1982		11-Apr-1982	2.6	11-May-1982	1.5	11-Jun-1982	0.7	11-Jul-1982	0.5
12-Feb-1982	3.7	12-Mar-1982		12-Apr-1982	2.7	12-May-1982		12-Jun-1982		12-Jul-1982	
13-Feb-1982	3.0	13-Mar-1982		13-Apr-1982	2.5	13-May-1982	1.3	13-Jun-1982	0.7	13-Jul-1982	0.5
14-Feb-1982	3.7	14-Mar-1982		14-Apr-1982	2.5	14-May-1982		14-Jun-1982		14-Jul-1982	
15-Feb-1982	3.5	15-Mar-1982		15-Apr-1982	2.4	15-May-1982	1.3	15-Jun-1982	0.7	15-Jul-1982	0.4
16-Feb-1982	3.2	16-Mar-1982		16-Apr-1982	2.3	16-May-1982		16-Jun-1982		16-Jul-1982	
17-Feb-1982	2.9	17-Mar-1982		17-Apr-1982	2.3	17-May-1982	1.3	17-Jun-1982	0.7	17-Jul-1982	0.4
18-Feb-1982		18-Mar-1982	4.5	18-Apr-1982		18-May-1982		18-Jun-1982		18-Jul-1982	
19-Feb-1982	3.8	19-Mar-1982	4.1	19-Apr-1982	2.0	19-May-1982	1.1	19-Jun-1982	0.7	19-Jul-1982	0.4
20-Feb-1982	3.7	20-Mar-1982	4.0	20-Apr-1982	2.0	20-May-1982		20-Jun-1982		20-Jul-1982	
21-Feb-1982	3.5	21-Mar-1982	4.6	21-Apr-1982	1.9	21-May-1982	1.1	21-Jun-1982	0.7	21-Jul-1982	0.4
22-Feb-1982		22-Mar-1982	4.3	22-Apr-1982	1.9	22-May-1982		22-Jun-1982		22-Jul-1982	
23-Feb-1982		23-Mar-1982		23-Apr-1982	1.8	23-May-1982	1.1	23-Jun-1982	0.7	23-Jul-1982	0.4
24-Feb-1982	4.0	24-Mar-1982		24-Apr-1982	1.7	24-May-1982		24-Jun-1982		24-Jul-1982	
25-Feb-1982	3.6	25-Mar-1982	4.9	25-Apr-1982	2.3	25-May-1982	1.1	25-Jun-1982		25-Jul-1982	0.4
26-Feb-1982	3.4	26-Mar-1982	4.2	26-Apr-1982	3.1	26-May-1982		26-Jun-1982	0.6	26-Jul-1982	
27-Feb-1982	4.0	27-Mar-1982	3.6	27-Apr-1982	2.6	27-May-1982	1.0	27-Jun-1982		27-Jul-1982	0.4
28-Feb-1982		28-Mar-1982	3.3	28-Apr-1982	2.1	28-May-1982		28-Jun-1982	0.6	28-Jul-1982	
		29-Mar-1982	3.1	29-Apr-1982	2.0	29-May-1982	1.0	29-Jun-1982	0.6	29-Jul-1982	0.4
		30-Mar-1982	3.0	30-Apr-1982	1.9	30-May-1982		30-Jun-1982	1.1	30-Jul-1982	
		31-Mar-1982	2.7			31-May-1982				31-Jul-1982	0.4

**Débits observés (Qobs) d'août 1982 à juillet 1983 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Aug-1982		1-Sep-1982		1-Oct-1982	0.3	1-Nov-1982		1-Dec-1982	3.5	1-Jan-1983	
2-Aug-1982		2-Sep-1982	0.3	2-Oct-1982		2-Nov-1982	0.2	2-Dec-1982	2.1	2-Jan-1983	0.8
3-Aug-1982		3-Sep-1982		3-Oct-1982	0.2	3-Nov-1982		3-Dec-1982	1.5	3-Jan-1983	2.5
4-Aug-1982		4-Sep-1982	0.3	4-Oct-1982		4-Nov-1982	0.3	4-Dec-1982		4-Jan-1983	
5-Aug-1982		5-Sep-1982		5-Oct-1982	0.2	5-Nov-1982		5-Dec-1982	0.6	5-Jan-1983	0.8
6-Aug-1982		6-Sep-1982	0.3	6-Oct-1982		6-Nov-1982	0.2	6-Dec-1982	1.4	6-Jan-1983	
7-Aug-1982		7-Sep-1982		7-Oct-1982	0.2	7-Nov-1982		7-Dec-1982		7-Jan-1983	1.2
8-Aug-1982		8-Sep-1982	0.3	8-Oct-1982		8-Nov-1982	0.2	8-Dec-1982	0.8	8-Jan-1983	
9-Aug-1982		9-Sep-1982		9-Oct-1982	0.2	9-Nov-1982		9-Dec-1982		9-Jan-1983	1.8
10-Aug-1982		10-Sep-1982	0.2	10-Oct-1982		10-Nov-1982	0.2	10-Dec-1982	0.5	10-Jan-1983	
11-Aug-1982		11-Sep-1982		11-Oct-1982	0.2	11-Nov-1982		11-Dec-1982		11-Jan-1983	1.0
12-Aug-1982		12-Sep-1982	0.2	12-Oct-1982		12-Nov-1982	0.1	12-Dec-1982	0.6	12-Jan-1983	
13-Aug-1982		13-Sep-1982		13-Oct-1982	0.2	13-Nov-1982		13-Dec-1982		13-Jan-1983	2.4
14-Aug-1982		14-Sep-1982	0.2	14-Oct-1982		14-Nov-1982	0.1	14-Dec-1982		14-Jan-1983	
15-Aug-1982		15-Sep-1982		15-Oct-1982	0.2	15-Nov-1982		15-Dec-1982	0.5	15-Jan-1983	1.4
16-Aug-1982	0.3	16-Sep-1982	0.2	16-Oct-1982		16-Nov-1982	0.2	16-Dec-1982		16-Jan-1983	
17-Aug-1982		17-Sep-1982		17-Oct-1982	0.2	17-Nov-1982		17-Dec-1982		17-Jan-1983	4.1
18-Aug-1982	0.3	18-Sep-1982	0.2	18-Oct-1982		18-Nov-1982	0.1	18-Dec-1982	0.5	18-Jan-1983	
19-Aug-1982		19-Sep-1982		19-Oct-1982	0.2	19-Nov-1982		19-Dec-1982		19-Jan-1983	4.5
20-Aug-1982	0.3	20-Sep-1982	0.2	20-Oct-1982		20-Nov-1982	0.2	20-Dec-1982	1.4	20-Jan-1983	
21-Aug-1982		21-Sep-1982		21-Oct-1982	0.2	21-Nov-1982		21-Dec-1982		21-Jan-1983	2.1
22-Aug-1982	0.3	22-Sep-1982	0.2	22-Oct-1982	0.3	22-Nov-1982	0.4	22-Dec-1982	2.4	22-Jan-1983	
23-Aug-1982		23-Sep-1982		23-Oct-1982	0.7	23-Nov-1982		23-Dec-1982	2.4	23-Jan-1983	1.9
24-Aug-1982	0.3	24-Sep-1982	0.2	24-Oct-1982		24-Nov-1982	0.6	24-Dec-1982		24-Jan-1983	1.7
25-Aug-1982		25-Sep-1982		25-Oct-1982	0.3	25-Nov-1982		25-Dec-1982	0.9	25-Jan-1983	
26-Aug-1982	0.3	26-Sep-1982	0.4	26-Oct-1982		26-Nov-1982	0.6	26-Dec-1982		26-Jan-1983	1.2
27-Aug-1982		27-Sep-1982		27-Oct-1982	0.2	27-Nov-1982		27-Dec-1982	1.0	27-Jan-1983	
28-Aug-1982		28-Sep-1982	0.3	28-Oct-1982		28-Nov-1982	0.3	28-Dec-1982		28-Jan-1983	1.7
29-Aug-1982	0.3	29-Sep-1982		29-Oct-1982	0.3	29-Nov-1982		29-Dec-1982	0.8	29-Jan-1983	
30-Aug-1982		30-Sep-1982	0.3	30-Oct-1982		30-Nov-1982	0.3	30-Dec-1982		30-Jan-1983	1.3
31-Aug-1982	0.3			31-Oct-1982	0.2			31-Dec-1982	0.8	31-Jan-1983	1.8

**Débits observés (Qobs) d'août 1982 à juillet 1983 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Feb-1983	1.8	1-Mar-1983	1.2	1-Apr-1983		1-May-1983		1-Jun-1983	
2-Feb-1983		2-Mar-1983	1.2	2-Apr-1983	0.7	2-May-1983	0.5	2-Jun-1983	0.3
3-Feb-1983	1.6	3-Mar-1983	1.2	3-Apr-1983		3-May-1983		3-Jun-1983	
4-Feb-1983	1.5	4-Mar-1983	1.2	4-Apr-1983	0.6	4-May-1983	0.5	4-Jun-1983	0.3
5-Feb-1983	3.1	5-Mar-1983	1.1	5-Apr-1983		5-May-1983		5-Jun-1983	
6-Feb-1983	1.6	6-Mar-1983	1.0	6-Apr-1983	0.6	6-May-1983	0.4	6-Jun-1983	0.3
7-Feb-1983	1.9	7-Mar-1983	1.0	7-Apr-1983		7-May-1983		7-Jun-1983	
8-Feb-1983	1.6	8-Mar-1983	1.0	8-Apr-1983	0.5	8-May-1983		8-Jun-1983	0.3
9-Feb-1983	1.4	9-Mar-1983	0.9	9-Apr-1983		9-May-1983		9-Jun-1983	
10-Feb-1983	1.4	10-Mar-1983	0.9	10-Apr-1983	0.6	10-May-1983		10-Jun-1983	0.3
11-Feb-1983		11-Mar-1983	0.9	11-Apr-1983		11-May-1983	0.5	11-Jun-1983	
12-Feb-1983	3.8	12-Mar-1983	0.9	12-Apr-1983	0.6	12-May-1983		12-Jun-1983	0.3
13-Feb-1983	2.2	13-Mar-1983		13-Apr-1983		13-May-1983	0.4	13-Jun-1983	
14-Feb-1983	1.9	14-Mar-1983	0.9	14-Apr-1983	0.5	14-May-1983		14-Jun-1983	0.3
15-Feb-1983		15-Mar-1983	0.9	15-Apr-1983		15-May-1983	0.4	15-Jun-1983	
16-Feb-1983		16-Mar-1983	1.4	16-Apr-1983	0.6	16-May-1983		16-Jun-1983	0.3
17-Feb-1983		17-Mar-1983	1.3	17-Apr-1983		17-May-1983	0.4	17-Jun-1983	
18-Feb-1983		18-Mar-1983	1.2	18-Apr-1983	0.6	18-May-1983		18-Jun-1983	0.3
19-Feb-1983		19-Mar-1983	1.2	19-Apr-1983		19-May-1983	0.4	19-Jun-1983	
20-Feb-1983		20-Mar-1983	2.3	20-Apr-1983	0.7	20-May-1983		20-Jun-1983	0.3
21-Feb-1983		21-Mar-1983	0.8	21-Apr-1983		21-May-1983	0.4	21-Jun-1983	
22-Feb-1983		22-Mar-1983	0.8	22-Apr-1983	0.6	22-May-1983		22-Jun-1983	0.3
23-Feb-1983		23-Mar-1983	1.1	23-Apr-1983		23-May-1983	0.4	23-Jun-1983	
24-Feb-1983		24-Mar-1983	1.0	24-Apr-1983	0.5	24-May-1983		24-Jun-1983	0.3
25-Feb-1983		25-Mar-1983	1.0	25-Apr-1983		25-May-1983	0.4	25-Jun-1983	
26-Feb-1983		26-Mar-1983	0.9	26-Apr-1983	0.5	26-May-1983		26-Jun-1983	0.3
27-Feb-1983		27-Mar-1983	1.0	27-Apr-1983		27-May-1983	0.4	27-Jun-1983	
28-Feb-1983		28-Mar-1983	1.0	28-Apr-1983	0.5	28-May-1983		28-Jun-1983	0.3
		29-Mar-1983	0.8	29-Apr-1983		29-May-1983	0.3	29-Jun-1983	
		30-Mar-1983	0.7	30-Apr-1983	0.5	30-May-1983		30-Jun-1983	0.3
		31-Mar-1983	0.7	31-May-1983	0.3	31-Jul-1983			

**Débits observés (Qobs) d'août 1983 à juillet 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)		
1-Aug-1983	0.2	1-Sep-1983		1-Oct-1983		1-Nov-1983	1.0	1-Dec-1983	0.5		
2-Aug-1983		2-Sep-1983	0.2	2-Oct-1983	0.1	2-Nov-1983		2-Dec-1983		2-Jan-1984	1.5
3-Aug-1983	0.2	3-Sep-1983		3-Oct-1983		3-Nov-1983	0.3	3-Dec-1983	0.3	3-Jan-1984	
4-Aug-1983		4-Sep-1983		4-Oct-1983	0.1	4-Nov-1983		4-Dec-1983		4-Jan-1984	3.3
5-Aug-1983	0.2	5-Sep-1983		5-Oct-1983		5-Nov-1983	0.3	5-Dec-1983	1.1	5-Jan-1984	
6-Aug-1983		6-Sep-1983	0.2	6-Oct-1983	0.1	6-Nov-1983		6-Dec-1983		6-Jan-1984	1.6
7-Aug-1983	0.2	7-Sep-1983		7-Oct-1983		7-Nov-1983	0.3	7-Dec-1983	1.1	7-Jan-1984	
8-Aug-1983		8-Sep-1983	0.1	8-Oct-1983	0.1	8-Nov-1983		8-Dec-1983		8-Jan-1984	1.8
9-Aug-1983		9-Sep-1983		9-Oct-1983		9-Nov-1983		9-Dec-1983	0.5	9-Jan-1984	
10-Aug-1983		10-Sep-1983	0.1	10-Oct-1983	0.1	10-Nov-1983		10-Dec-1983		10-Jan-1984	
11-Aug-1983	0.2	11-Sep-1983		11-Oct-1983		11-Nov-1983		11-Dec-1983	0.4	11-Jan-1984	
12-Aug-1983		12-Sep-1983	0.2	12-Oct-1983	0.1	12-Nov-1983		12-Dec-1983	1.0	12-Jan-1984	2.8
13-Aug-1983	0.2	13-Sep-1983		13-Oct-1983		13-Nov-1983	0.3	13-Dec-1983		13-Jan-1984	
14-Aug-1983		14-Sep-1983	0.2	14-Oct-1983	0.1	14-Nov-1983		14-Dec-1983	0.5	14-Jan-1984	3.0
15-Aug-1983	0.2	15-Sep-1983		15-Oct-1983		15-Nov-1983	0.3	15-Dec-1983		15-Jan-1984	
16-Aug-1983		16-Sep-1983	0.2	16-Oct-1983	0.1	16-Nov-1983		16-Dec-1983	0.8	16-Jan-1984	2.9
17-Aug-1983	0.2	17-Sep-1983		17-Oct-1983		17-Nov-1983	0.3	17-Dec-1983		17-Jan-1984	
18-Aug-1983		18-Sep-1983	0.1	18-Oct-1983	0.1	18-Nov-1983		18-Dec-1983	0.5	18-Jan-1984	
19-Aug-1983	0.2	19-Sep-1983		19-Oct-1983		19-Nov-1983	0.2	19-Dec-1983		19-Jan-1984	
20-Aug-1983		20-Sep-1983	0.1	20-Oct-1983	0.1	20-Nov-1983		20-Dec-1983	0.6	20-Jan-1984	
21-Aug-1983	0.2	21-Sep-1983		21-Oct-1983		21-Nov-1983	0.2	21-Dec-1983		21-Jan-1984	
22-Aug-1983		22-Sep-1983	0.1	22-Oct-1983	0.1	22-Nov-1983		22-Dec-1983	0.7	22-Jan-1984	
23-Aug-1983	0.2	23-Sep-1983		23-Oct-1983		23-Nov-1983	0.2	23-Dec-1983		23-Jan-1984	
24-Aug-1983		24-Sep-1983	0.1	24-Oct-1983	0.1	24-Nov-1983		24-Dec-1983	0.5	24-Jan-1984	
25-Aug-1983	0.2	25-Sep-1983		25-Oct-1983		25-Nov-1983	0.2	25-Dec-1983		25-Jan-1984	
26-Aug-1983		26-Sep-1983	0.1	26-Oct-1983	0.1	26-Nov-1983		26-Dec-1983	0.7	26-Jan-1984	
27-Aug-1983	0.1	27-Sep-1983		27-Oct-1983		27-Nov-1983	0.3	27-Dec-1983	0.7	27-Jan-1984	
28-Aug-1983		28-Sep-1983	0.1	28-Oct-1983		28-Nov-1983		28-Dec-1983		28-Jan-1984	
29-Aug-1983	0.1	29-Sep-1983		29-Oct-1983		29-Nov-1983	0.4	29-Dec-1983	0.5	29-Jan-1984	
30-Aug-1983		30-Sep-1983	0.1	30-Oct-1983		30-Nov-1983		30-Dec-1983		30-Jan-1984	
31-Aug-1983	0.1			31-Oct-1983				31-Dec-1983	1.2	31-Jan-1984	

**Débits observés (Q<sub>obs</sub>) d'août 1983 à juillet 1984 - Bassin de la Tolomosa**

Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)	Date	Q <sub>obs</sub> (mm)
1-Feb-1984		1-Mar-1984		1-Apr-1984		1-May-1984		1-Jun-1984	0.6
2-Feb-1984		2-Mar-1984		2-Apr-1984		2-May-1984	1.3	2-Jun-1984	
3-Feb-1984		3-Mar-1984		3-Apr-1984		3-May-1984		3-Jun-1984	
4-Feb-1984		4-Mar-1984		4-Apr-1984		4-May-1984		4-Jun-1984	
5-Feb-1984		5-Mar-1984		5-Apr-1984		5-May-1984		5-Jun-1984	0.6
6-Feb-1984		6-Mar-1984		6-Apr-1984		6-May-1984		6-Jun-1984	
7-Feb-1984		7-Mar-1984		7-Apr-1984		7-May-1984		7-Jun-1984	
8-Feb-1984		8-Mar-1984		8-Apr-1984		8-May-1984	1.1	8-Jun-1984	
9-Feb-1984		9-Mar-1984		9-Apr-1984		9-May-1984		9-Jun-1984	
10-Feb-1984		10-Mar-1984		10-Apr-1984		10-May-1984		10-Jun-1984	
11-Feb-1984		11-Mar-1984		11-Apr-1984	2.9	11-May-1984		11-Jun-1984	
12-Feb-1984		12-Mar-1984		12-Apr-1984		12-May-1984	0.9	12-Jun-1984	
13-Feb-1984		13-Mar-1984		13-Apr-1984		13-May-1984		13-Jun-1984	
14-Feb-1984		14-Mar-1984		14-Apr-1984		14-May-1984		14-Jun-1984	
15-Feb-1984		15-Mar-1984		15-Apr-1984		15-May-1984		15-Jun-1984	
16-Feb-1984		16-Mar-1984		16-Apr-1984		16-May-1984	0.9	16-Jun-1984	
17-Feb-1984		17-Mar-1984		17-Apr-1984		17-May-1984		17-Jun-1984	
18-Feb-1984		18-Mar-1984		18-Apr-1984		18-May-1984	0.8	18-Jun-1984	
19-Feb-1984		19-Mar-1984		19-Apr-1984		19-May-1984		19-Jun-1984	
20-Feb-1984		20-Mar-1984		20-Apr-1984		20-May-1984		20-Jun-1984	0.5
21-Feb-1984		21-Mar-1984		21-Apr-1984		21-May-1984		21-Jun-1984	
22-Feb-1984		22-Mar-1984		22-Apr-1984		22-May-1984	0.8	22-Jun-1984	
23-Feb-1984		23-Mar-1984		23-Apr-1984		23-May-1984		23-Jun-1984	
24-Feb-1984		24-Mar-1984		24-Apr-1984	1.6	24-May-1984		24-Jun-1984	
25-Feb-1984		25-Mar-1984		25-Apr-1984		25-May-1984		25-Jun-1984	
26-Feb-1984		26-Mar-1984		26-Apr-1984	1.6	26-May-1984	0.7	26-Jun-1984	
27-Feb-1984		27-Mar-1984		27-Apr-1984		27-May-1984		27-Jun-1984	
28-Feb-1984		28-Mar-1984		28-Apr-1984	1.5	28-May-1984		28-Jun-1984	
29-Feb-1984		29-Mar-1984		29-Apr-1984		29-May-1984		29-Jun-1984	
		30-Mar-1984		30-Apr-1984	1.4	30-May-1984		30-Jun-1984	0.5
		31-Mar-1984				31-May-1984		31-Jun-1984	
								1-Jul-1984	
								2-Jul-1984	
								3-Jul-1984	
								4-Jul-1984	
								5-Jul-1984	
								6-Jul-1984	
								7-Jul-1984	
								8-Jul-1984	
								9-Jul-1984	
								10-Jul-1984	0.4
								11-Jul-1984	
								12-Jul-1984	
								13-Jul-1984	
								14-Jul-1984	
								15-Jul-1984	
								16-Jul-1984	0.3
								17-Jul-1984	
								18-Jul-1984	
								19-Jul-1984	
								20-Jul-1984	
								21-Jul-1984	
								22-Jul-1984	
								23-Jul-1984	
								24-Jul-1984	0.3
								25-Jul-1984	
								26-Jul-1984	
								27-Jul-1984	
								28-Jul-1984	
								29-Jul-1984	
								30-Jul-1984	0.2
								31-Jul-1984	

**ANNEXE II-2: couverture végétale et occupation des terres  
dans le bassin versant de la Tolomosa selon la  
nomenclature FAO/UNESCO et SWAT**



N°	Code (FAO)	Couverture végétale	Superficie				N°	Occupation dominante	Code (SWAT)	N°	Occupation dominante	Code SWAT	Superficie	
			(ha)	(%)	(ha)	(%)							(ha)	(%)
1	1A3c	Bosque denso a ralo mayormente siempre verde, semidecuido, montano	908	2.08			1		FRST	1	FRST	1 176	2.8	
2	2A3c	Bosque ralo a semidenso, mayormente siempre verde, semidecuido, montano	115	0.26	1 176	2.7	1	Silvopastoril con bovinos, ovinos y caprinos en laderas. Extracción de leña						
23	Pf	Bosque implantado,	85	0.19			1							
3	2B3c	Bosque ralo a semidenso, mayormente caducifolio, semidecuido, montano	68	0.16			1			2	RNGB	2 650	6.3	
4	3A3c	Matorral semidenso, medio, mayormente siempre verde, semidecuido, montano	2 327	5.33	2 650	6.1	2	Silvopastoril con bovinos, ovinos y caprinos en matorrales de laderas - Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino	RNGB					
5	3A4c	Matorral semidenso, medio, mayormente siempre verde, decuido por sequía, montano	323	0.74			2			3	RNGE	2 561	5.8	
6	3B3c	Matorral denso a ralo, medio, mayormente caducifolio semidecuido, montano	643	1.47	2 561	5.9	3	Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino - Pastoreo extensivo continuo en pastizal matorral - Silvopastoril con bovinos, ovinos y caprinos en matorrales de laderas	RNGE					
7	3B4c	Matorral ralo, bajo a medio, mayormente caducifolio, decuido por sequía, montano	1 801	4.12			3							
8	3B4d	Matorral denso, medio, mayormente caducifolio, decuido por sequía, subalpino	117	0.27			3			4	WPAS	6 364	14.6	
9	3C4c	Matorral denso a semidenso, alto, xeromórfico, decuido por sequía, montano	3 363	7.7	3 363	7.7	4	Pastoreo extensivo en matorral xeromórfico de sustitución con ganado bovino. Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino	WPAS					
10	3C5c	Matorral ralo a semidenso, xeromórfico, mayormente espinoso, montano	3 001	6.87	3 001	6.9	4		WPAS	5	SPAS	6 082	13.9	
11	5E9c	Vegetación herbácea semidensa, graminoide intermedia, con sinusia arbustiva, montano	2 418	5.54	4 989	11.4	5	Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino	SPAS(a)					
12	5E9d	Vegetación herbácea rala, graminoide intermedia, con sinusia arbustiva, subalpino	2 571	5.89			5		SPAS(a)					
13	5E12c	Vegetación herbácea rala, graminoide intermedia, sin sinusia arbustiva, montano	155	0.35			6	Pastoreo extensivo y cultivos agrícolas dispersos	SPAS(b)	6	PAST	17 376	39.8	
14	5E12c(7)	Vegetación herbácea semidensa, graminoide intermedia, sin sinusia arbustiva, montano, amacollado	938	2.15	1093	2.5	6		SPAS(b)					
15	5F9c	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, con sinusia arbustiva, montano	2 602	5.96	3 846	8.8	7	Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino - Pastoreo extensivo con ganado mixto	PAST(a)	6	PAST	17 376	39.8	
18	5F9d	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, con sinusia arbustiva, subalpino	1 244	2.85			7		PAST(a)					
16	5F12c	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja sin sinusia arbustiva, montano	1 465	3.35	9 387	21.5	8	Pastoreo extensivo con ganado bovino - Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino	PAST(b)					
19	5F12d	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, subalpino	6 506	14.9			8		PAST(b)					
20	5F12d(8)	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, cespitoso, subalpino	199	0.46			8		PAST(b)					
21	5F12h	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, alpino.	1 217	2.79			8		PAST(b)					
17	5F14c	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, mixto, montano	3 973	9.1	4 143	9.5	9	Pastoreo extensivo con ganado bovino y ovino - Pastoreo extensivo con ganado mixto	PAST(c)					
22	5H12c	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, hidromórfica, montano	170	0.39			9		PAST(c)	7	AGRC	6 192	14.6	
24	6	Áreas antrópicas (Cultivos agrícolas a secano, matorrales, pastizales y cultivos a riego)	6 192	14.2	6 192	14.2	10	Agrícola intensiva con cultivos anuales y perennes - Agrícola extensiva con cultivos anuales y perennes	AGRC					
25	R	Llanura de inundación	739	1.69	739	1.7	11	Lecho de río	WATR	8	WATR	739	1.7	
26	CA	Embalse San Jacinto	460	1.05	460	1.1	12	Embalse San Jacinto	EMBALSE	9	EMBALSE	460	1.1	
27	U	Caserío (poblaciones)	72	0.16	72	0.2	13	Conurbanización - Agrícola intensivos con cultivos anuales y perennes	URLD	10	URLD	72	0.2	
<b>T O T A L</b>			<b>43 672</b>	<b>100</b>	<b>43672</b>	<b>100.0</b>						<b>43672</b>	<b>100.0</b>	



**ANNEXE II-3: classification FAO et USDA des sols du  
bassin versant de la Tolomosa**

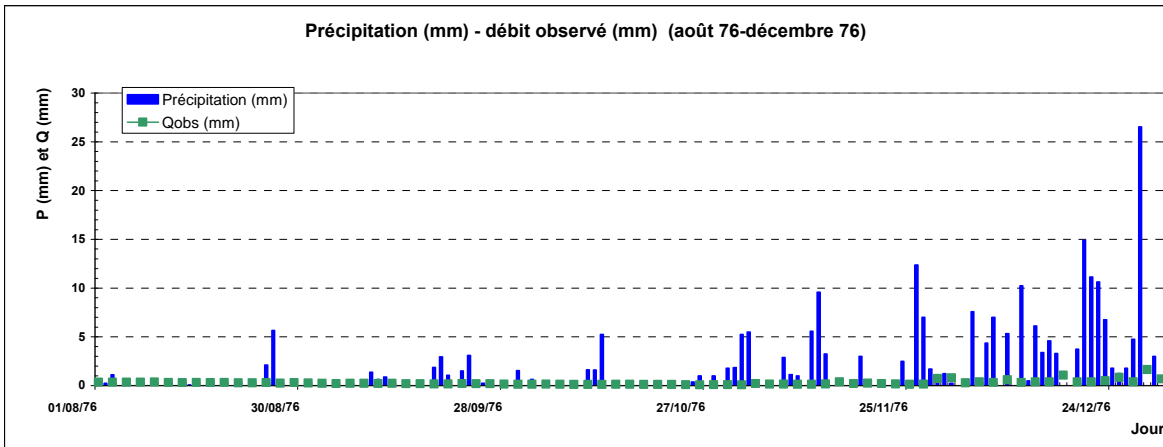


N°	N° groupe	Classification				Sol dominant	Groupe hydrologique	Superficie	
		FAO	FAO	USDA	USDA			(ha)	(%)
1	1	Association cambisol-fluvisol	Cambisol eutrico	Typic ustochrept	JDER	JDER	B	3.076	7,3
3		Association cambisol-phaeozem	Cambisol eutrico	Typic ustochrept	JDER				
18		Association cambisol-régosol	Régosol eutrico	Lithic ustorthent	LEDB				
22		<b>Consociation cambisol</b>	Cambisol eutrico	Typic ustochrept	JDER				
2	2	<b>Association cambisol-lixisol</b>	Cambisol eutrico	Typic ustochrept	JDER	JDER(2)	C	3.462	8,3
4	3	Association fluvisol-cambisol	Régosol eutrico	Udic ustorthent	LEDN	LDCJ	B	1.204	2,9
5		Association fluvisol-régosol	Fluvisol eutrico	Typic ustifluent	LDCJ				
6	4	<b>Association leptosol-cambisol</b>	Leptosol eutrico	Lithic ustorthent	LEDB	LEDB	B	2.242	5,3
7		Association leptosol-lixisol	Lixisol haplico	Typic haplustalf	JCHX				
8	5	<b>Association leptosol-régosol</b>	Leptosol eutrico	Lithic ustorthent	LEDB	LEDB(2)	B	9.145	21,8
9	6	Association lixisol-cambisol	Lixisol haplico	Typic haplustalf	JCHX	JCHX	C	2.326	5,5
20		<b>Consociation lixisol</b>	Lixisol haplico	Typic haplustalf	JCHX				
10	7	Association phaeozem-cambisol	Phaeozem haplico	Typic ustochrept	JDER	IGFA	B	6.482	15,5
11		Association phaeozem-fluvisol	Phaeozem haplico	Typic ustifluent	LDCJ				
21		<b>Consociation phaeozem</b>	Phaeozem haplico	Typic hapludoll	IGFA				
12	8	Association régosol-cambisol	Régosol eutrico	Typic ustorthent	LEDN	LEDN	B	2.392	5,7
17		Association régosol-cambisol-phaeozem	Régosol eutrico	Lithic ustorthent	LEDB				
23		<b>Consociation régosol</b>	Arenosol haplico	Typic ustorthent	LEDN				
13	9	<b>Association régosol-cambisol-lixisol</b>	Régosol eutrico	Aridic ustorthent	LEDK	LEDK	D	3.163	7,5
14	10	Association régosol-leptosol	Régosol eutrico	Typic ustorthent	LEDN	LEDB(3)	B	4.386	10,5
19		<b>Consociation leptosol</b>	Leptosol eutrico	Lithic ustorthent	LEDB				
15	11	<b>Association cambisol-leptosol-phaeozem</b>	Cambisol eutrico	Typic ustochrept	JDER	JDER(3)	B	1.849	4,4
16	12	<b>Association régosol-cambisol-fluvisol</b>	Régosol eutrico	Typic ustochrept	JDER	JDER(4)	B	798	1,9
	13	Autres							1,1

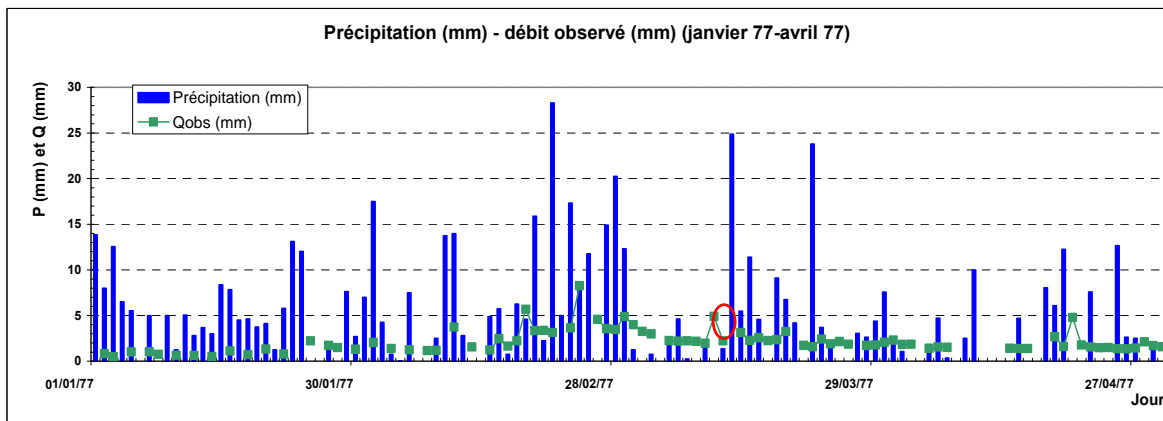


**ANNEXE II-4: comparaison par année hydrologique entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1976 à juillet 1984**

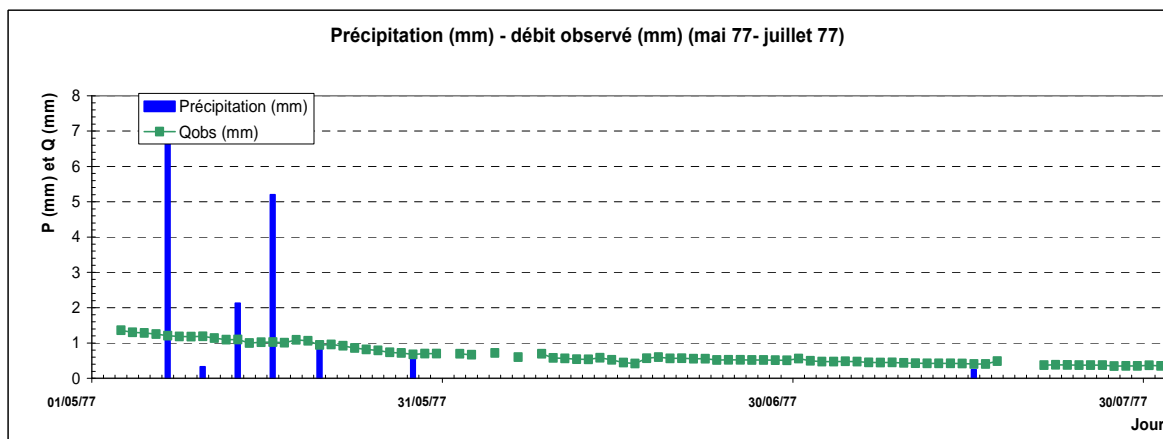




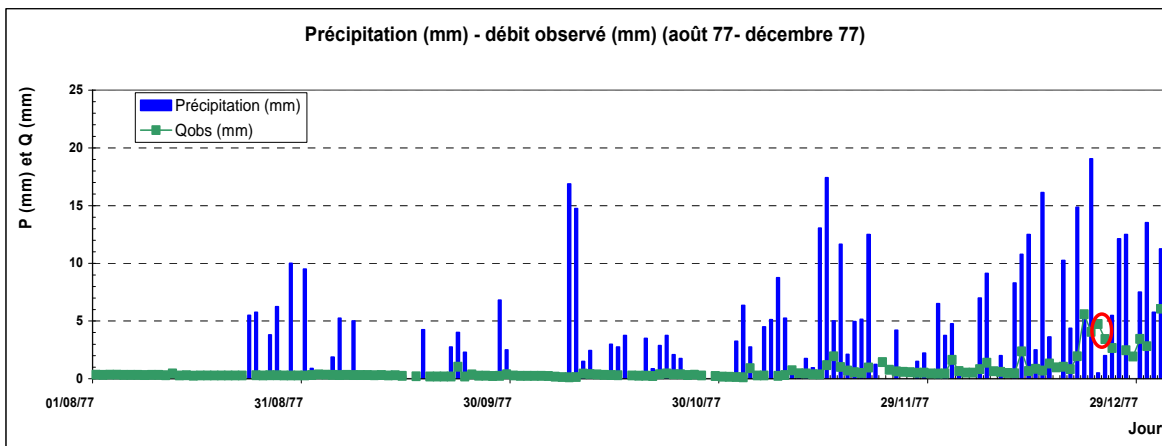
**Figure 1:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1976 à décembre 1976



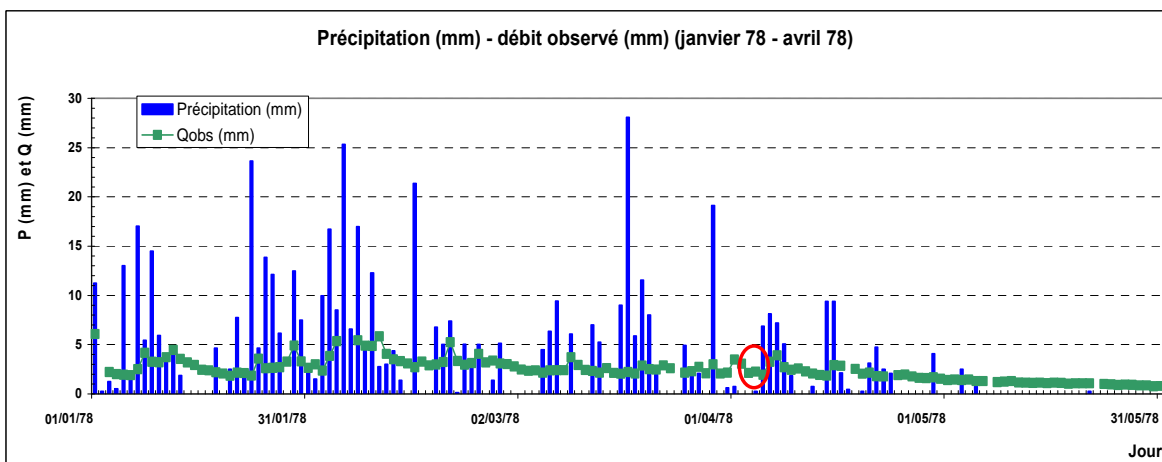
**Figure 2:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1977 à avril 1977



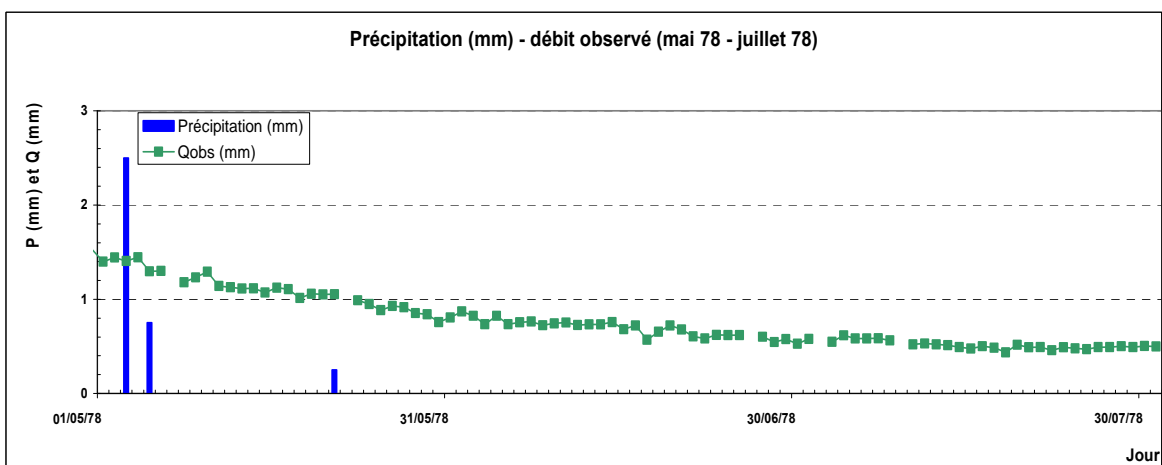
**Figure 3:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1977 à juillet 1977.



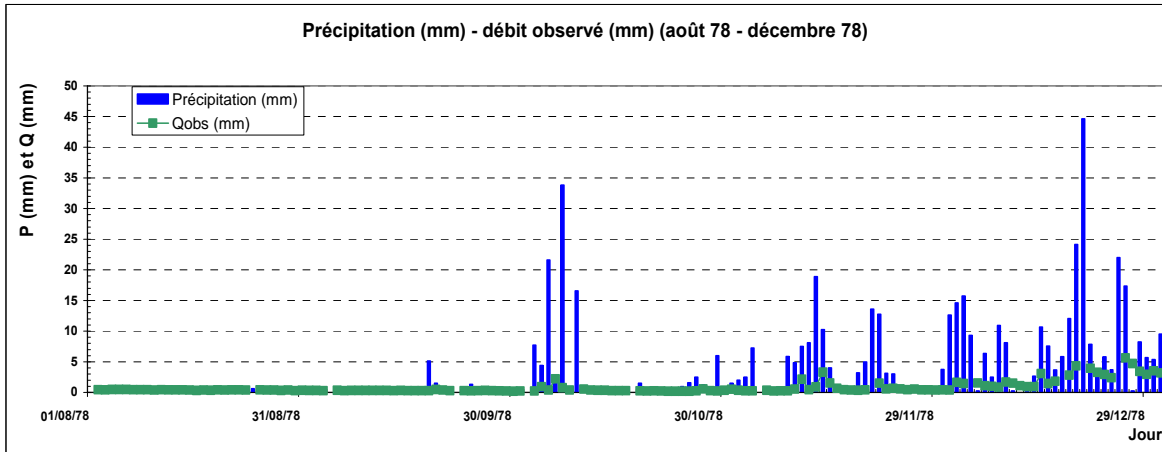
**Figure 4:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1977 à décembre 1977



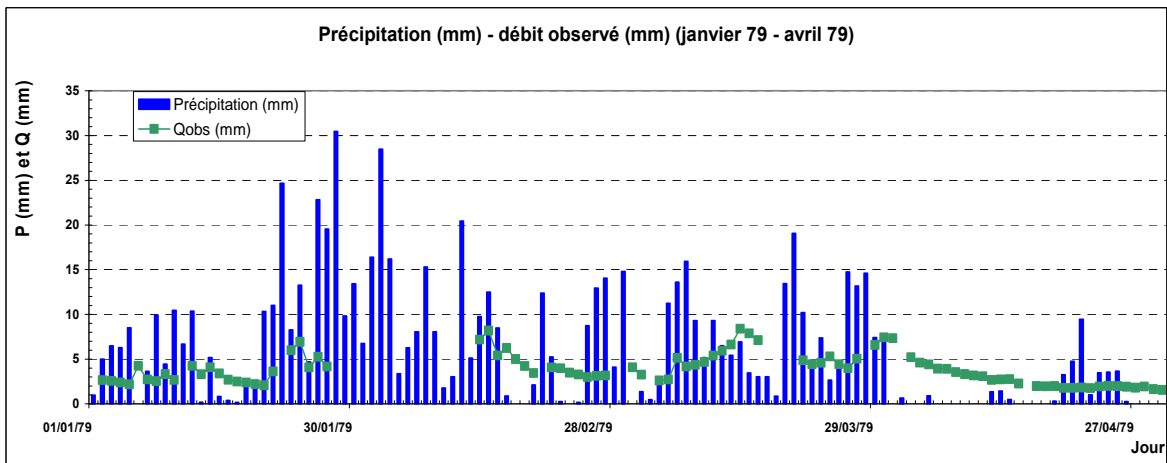
**Figure 5:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1978 à avril 1978



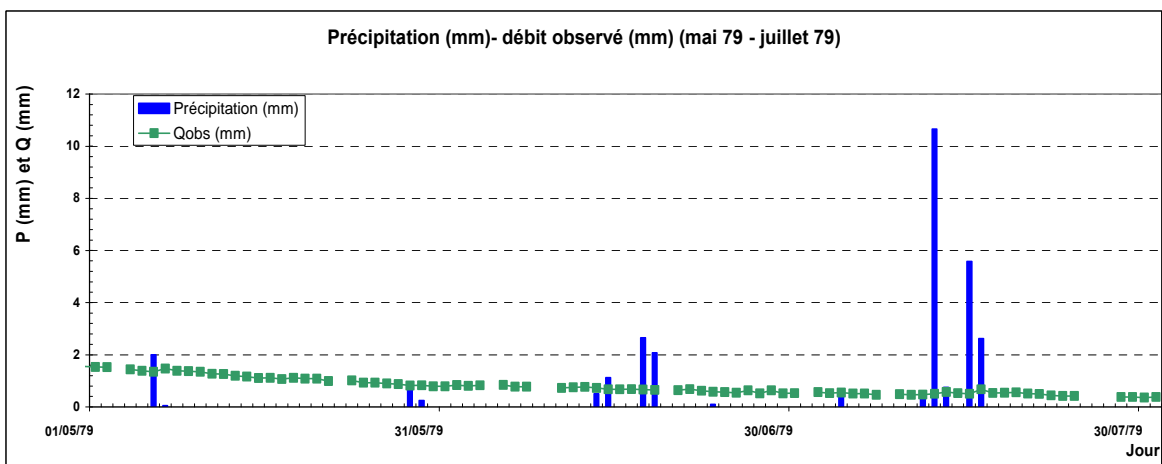
**Figure 6:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1978 à juillet 1978



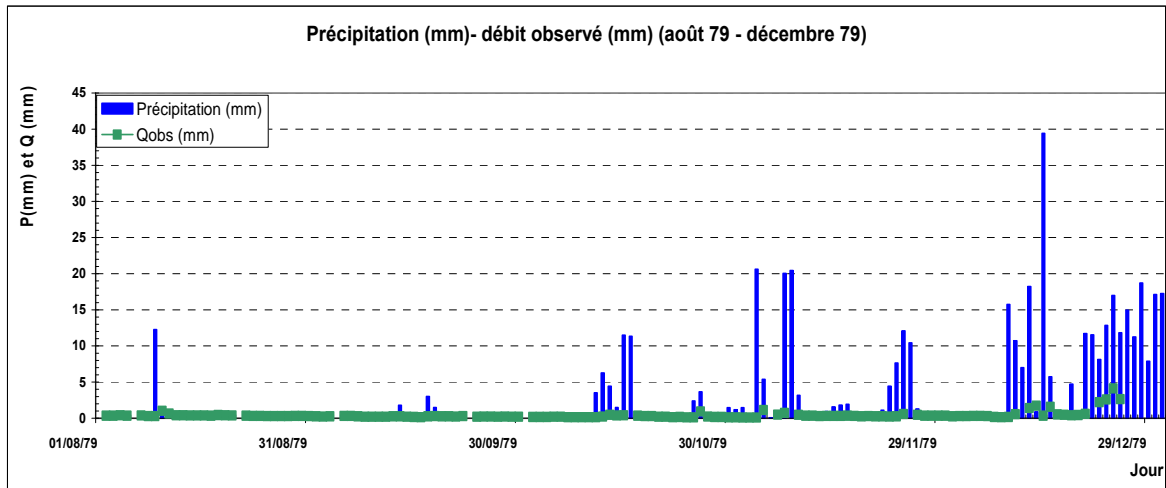
**Figure 7:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1978 à décembre 1978



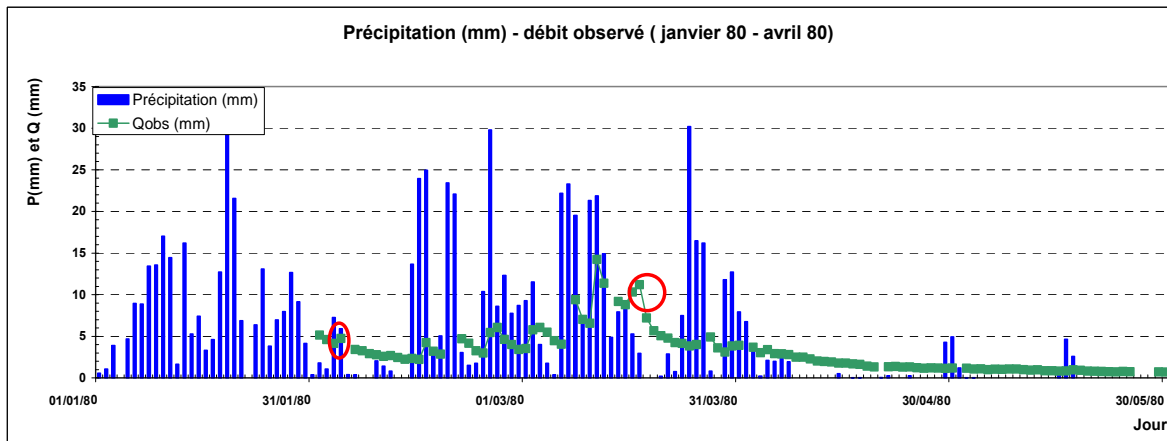
**Figure 8:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1979 à avril 1979



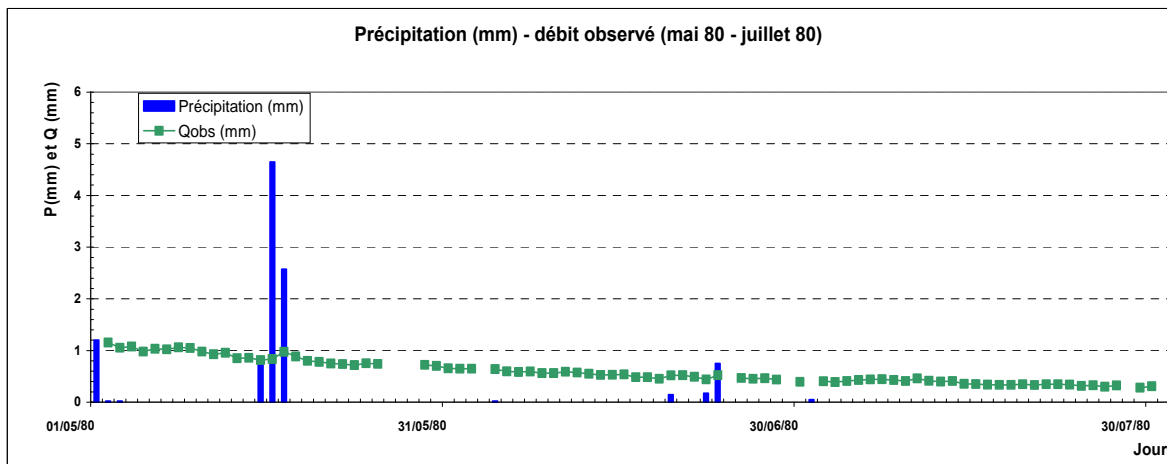
**Figure 9:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1979 à juillet 1979



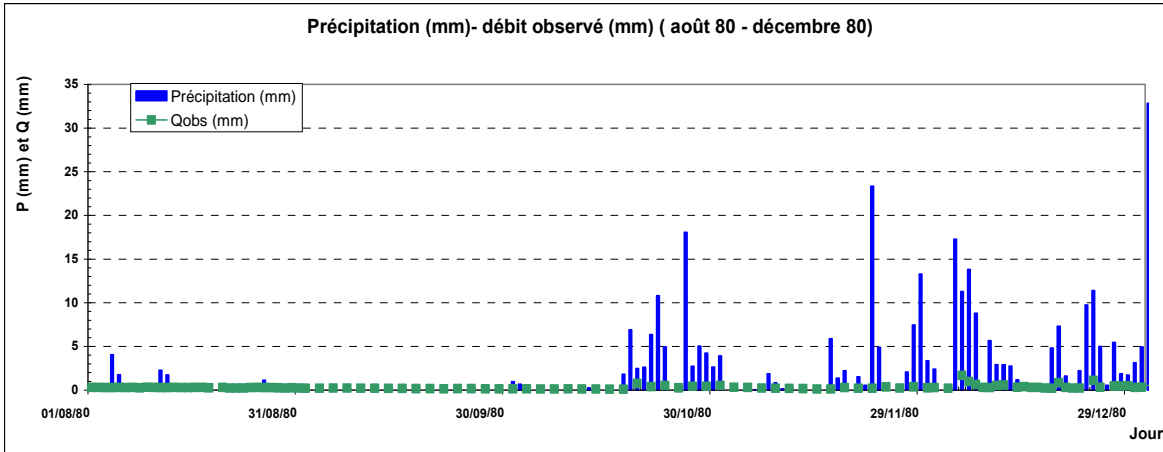
**Figure 10:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1979 à décembre 1979



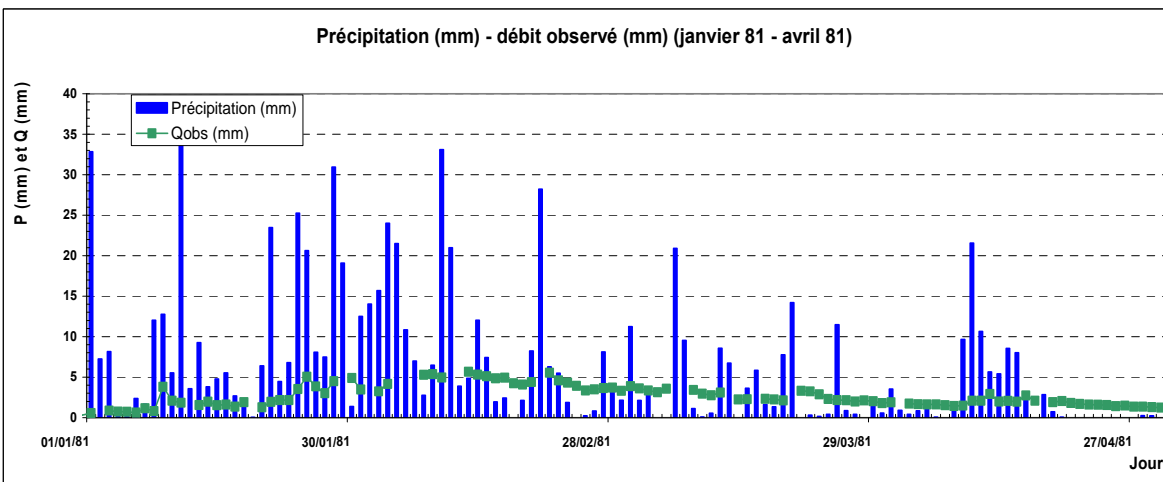
**Figure 11:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1980 à avril 1980



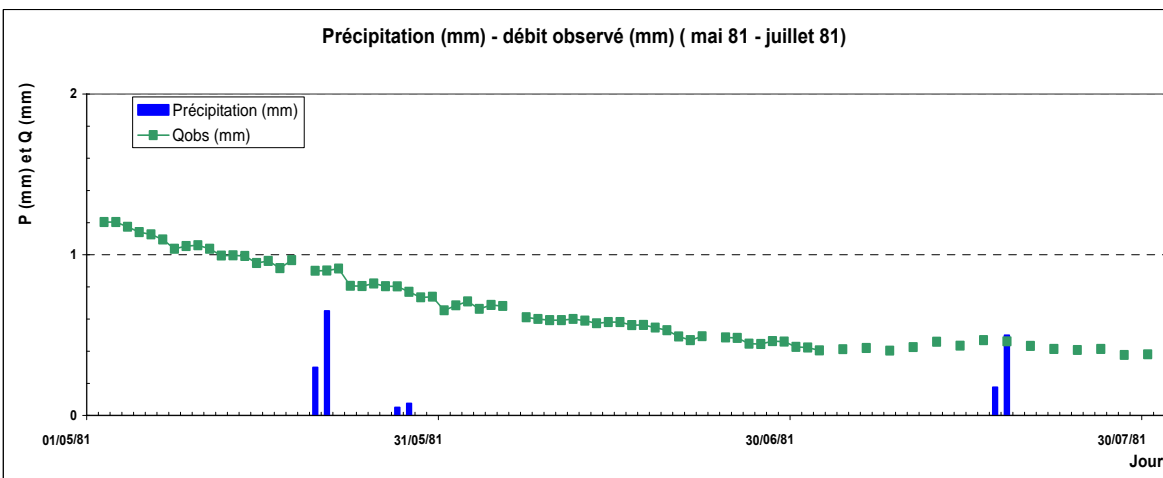
**Figure 12:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1980 à juillet 1980



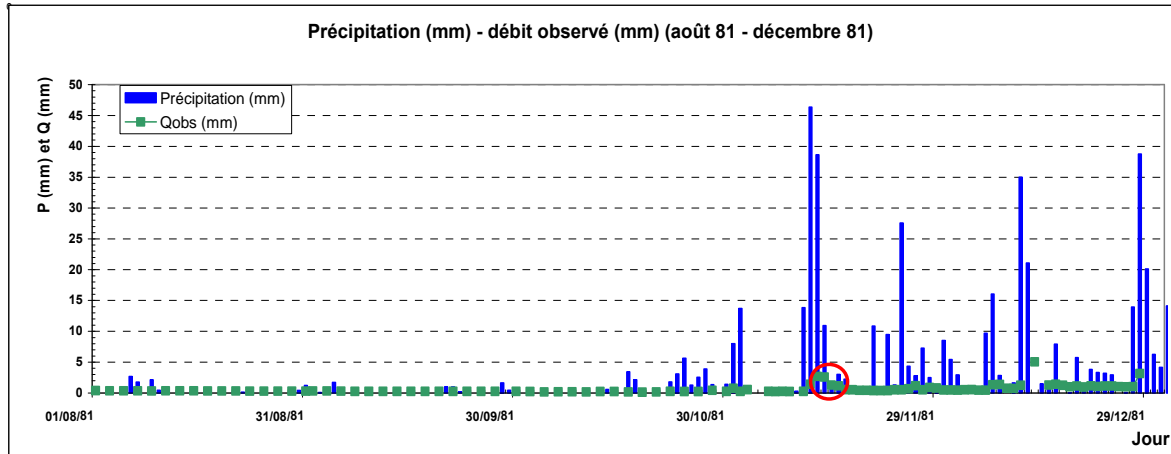
**Figure 13:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1980 à décembre 1980



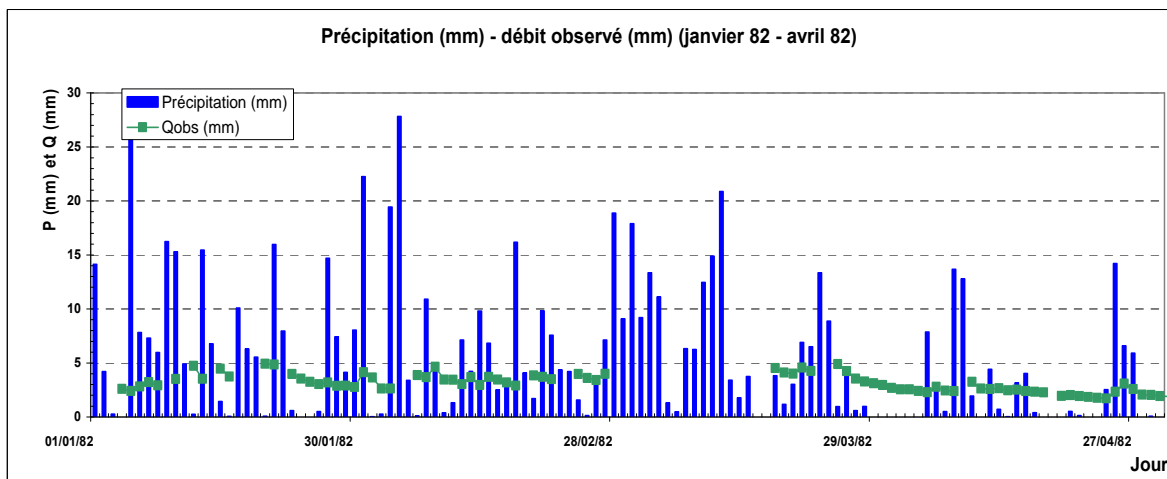
**Figure 14:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1981 à avril 1981



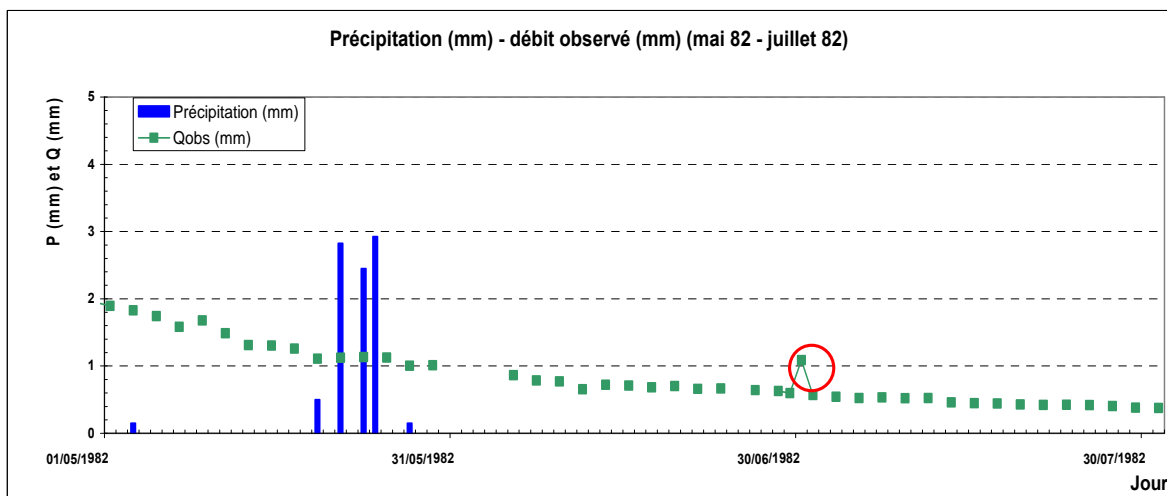
**Figure 15:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1981 à juillet 1981



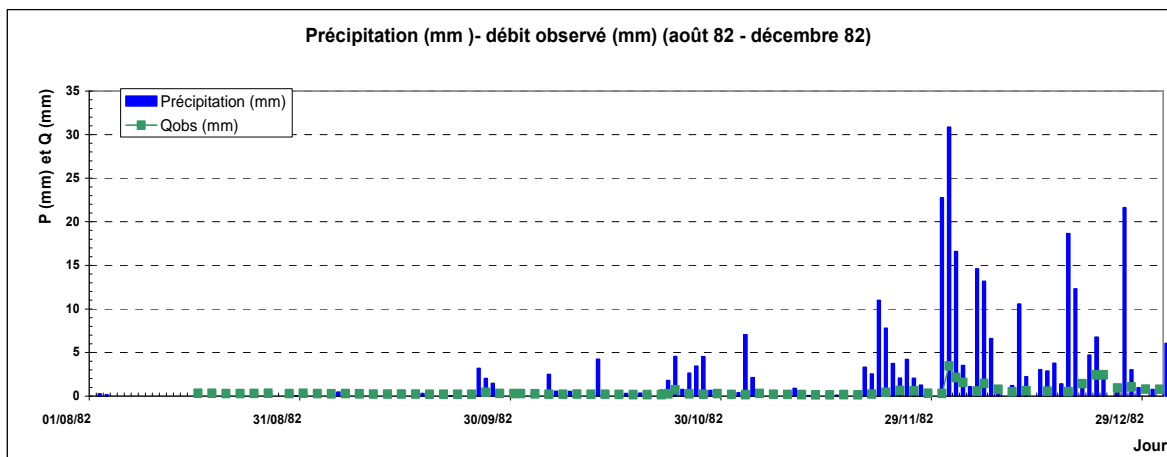
**Figure 16:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1981 à décembre 1981



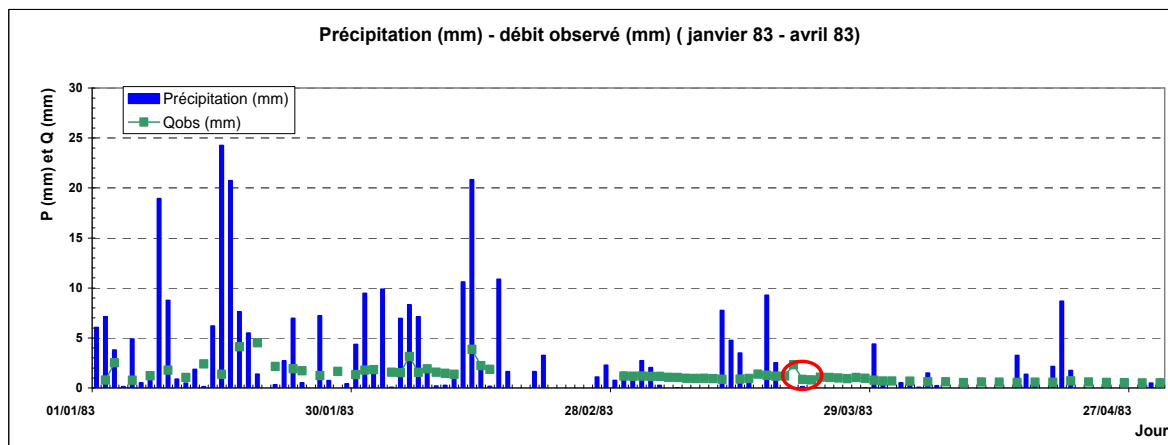
**Figure 17:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1982 à avril 1982



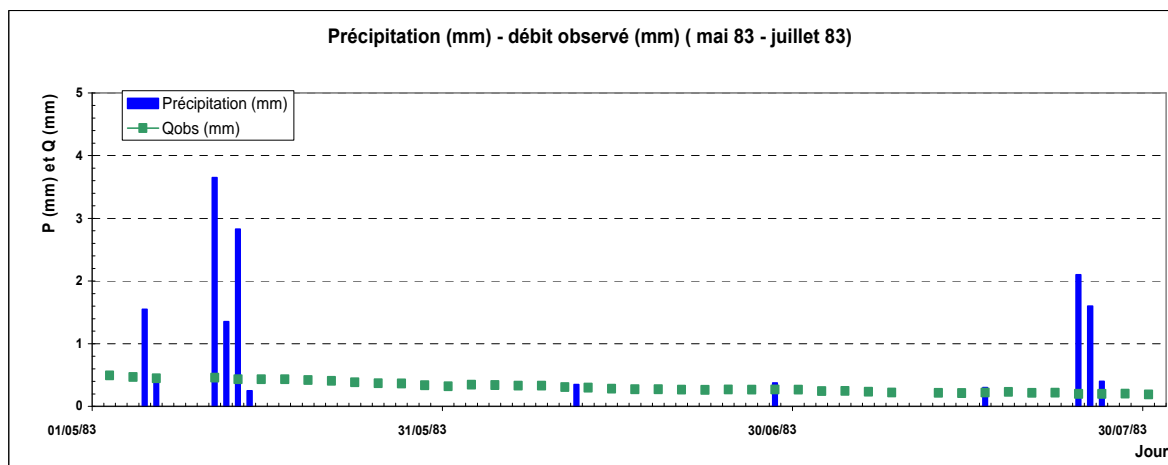
**Figure 18:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1982 à juillet 1982



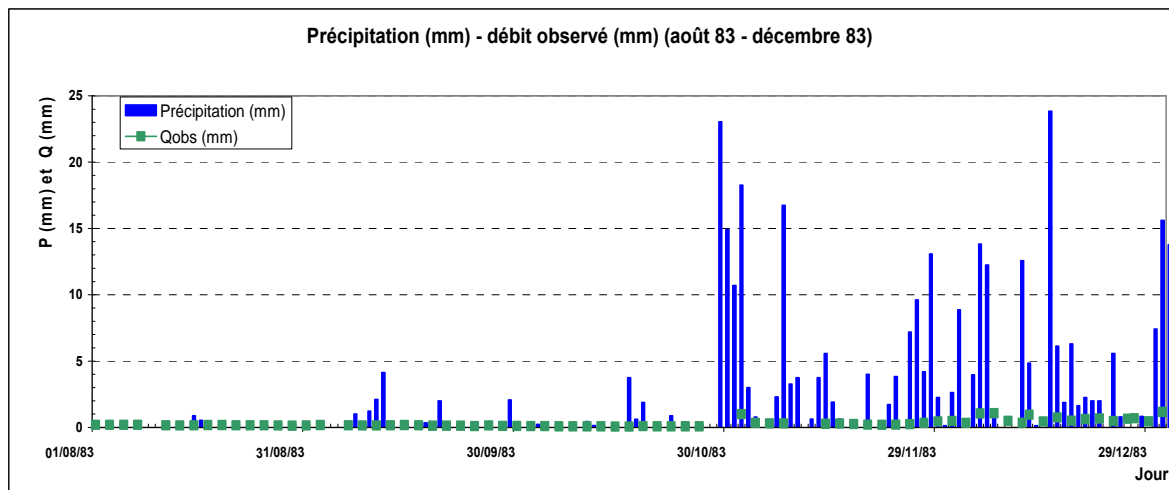
**Figure 19:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1982 à décembre 1982



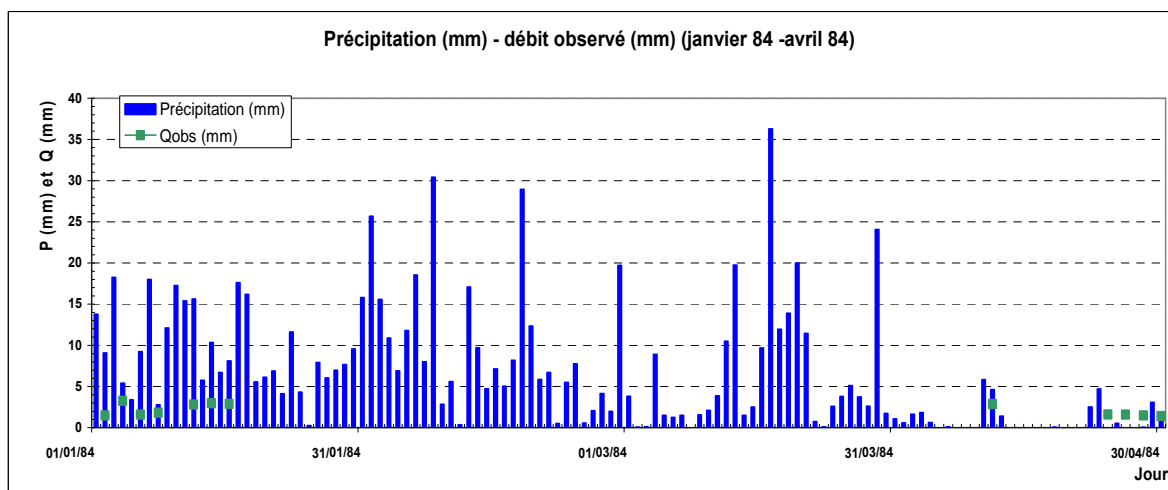
**Figure 20:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1983 à avril 1983



**Figure 21:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de mai 1983 à juillet 1983



**Figure 22:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période d'août 1983 à décembre 1983



**Figure 23:** comparaison par années hydrologiques entre les valeurs des débits observés journaliers ( $Q_{obs}$ ) et l'histogramme des précipitations journalières aux dates correspondantes sur la période de janvier 1984 à avril 1984

**ANNEXE III-1: valeurs du CN par modélisation et sous-bassin versant**



Modélisation	CN	Bassin (*)	TolomosaA				Mena									
			WPAS/ JDER(2)	WPAS/ LEDK	AGRC/ JDER(2)	FRST/ JDER(2)	PAST/ LEDB(3)	WPAS/ JCHX	WPAS/ LEDK	PAST/ LEDB	FRST/ JCHX	PAST/ LEDK	FRST/ JDER(2)			
TOLOSA	CN <sub>2</sub> calibré		54				60									
TOLOSA1	CN <sub>2</sub> calibré	58	60				65									
TOLOFI	CN <sub>2</sub> SWAT	69	69				69									
	CN <sub>2s</sub> SWAT	74	73				73									
TOLOMAT	CN <sub>2</sub> matrice	79	81				83									
	CN <sub>2</sub> matrice		81				83									
TOLO3A	CN <sub>2s</sub> SWAT	74	73				73									
	CN <sub>2s</sub> SWAT		82	84			73			73				--	--	
HRUFOR	CN <sub>2s</sub> SWAT		82		84		73			73				--	73	73

(\*) Comme le logiciel travaille par HRU, il ne calcule pas le CN du bassin, mais uniquement par HRU. Le CN du bassin peut être obtenu par une moyenne pondérée entre les CN des sous-bassins  
 Dans le cas des CN calibrés, on n'a pas tenu compte de la pente

Modélisation	CN	Bassin (*)	Sola	Pinos	
			PAST/ IGFA	PAST/ LEDB(2)	FRST/ JDER(4)
TOLOSA	CN <sub>2</sub> calibré		65	62	
TOLOSA1	CN <sub>2</sub> calibré	58	65	55	
TOLOFI	CN <sub>2</sub> SWAT	69	69	69	
	CN <sub>2s</sub> SWAT	74	74	74	
TOLOMAT	CN <sub>2</sub> matrice	79	74	80	
TOLO3A	CN <sub>2</sub> matrice		74	80	
	CN <sub>2s</sub> SWAT	74	74	74	
TOLOHRU	CN <sub>2s</sub> SWAT		74	74	--
HRUFOR	CN <sub>2s</sub> SWAT		74	74	70

(\*) Comme le logiciel travaille par HRU, il ne calcule pas le CN du bassin, mais uniquement par HRU. Le CN du bassin peut être obtenu par une moyenne pondérée entre les CN des sous-bassins. On ne tient pas compte de la pente dans le cas des CN calibrés.

**ANNEXE III-2: matrice des valeurs du CN en fonction des groupes hydrologiques, des unités géomorphologiques et des unités d'occupation des terres du bassin versant de la Tolomosa**



Matrice des valeurs du CN en fonction des groupes hydrologiques, des unités géomorphologiques et des unités d'occupation des terres – Bassin de la Tolomosa

Unité d'occupation des terres	Groupe hydrologique attribué par unité géomorphologique numérotée de 1 à 43															
	B+2	B	A+3	B	C	BC-1	C-2	C-2	C+2	B-2	B	C+1	C-D	C-D	C-D	CD-1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
AGRC	77	75	68	75	78	77	80	84	73	75	83	84	84	84	83	
RESERVOIR	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
FRST	62	60	39	60	67	66	71	75	58	60	74	76	76	76	75	
PAST(c)	69	67	50	67	74	73	79	83	65	67	82	84	84	84	83	
PAST(a)	69	67	50	67	74	73	79	83	65	67	82	84	84	84	83	
PAST(b)	69	67	50	67	74	73	79	83	65	67	82	84	84	84	83	
RNGB	61	59	28	59	67	66	73	77	57	59	76	79	79	79	78	
RNGE	61	59	28	59	67	66	73	77	57	59	76	79	79	79	78	
SPAS(a)	61	59	28	59	67	66	73	77	57	59	76	79	79	79	78	
SPAS(b)	69	67	50	67	74	73	79	83	65	67	82	84	84	84	83	
URLD	86	84	75	84	87	86	88	91	82	84	91	91	91	91	90	
WATR	86	84	75	84	87	86	88	91	82	84	91	91	91	91	90	
WPAS	61	59	28	59	67	66	73	77	57	59	76	79	79	79	78	

Exemple: le CN attribué à une occupation agricole des terres (AGRC) qui couvre l'unité géomorphologique 1 est de 77 (conditions favorables), c'est-à-dire B + 2 ou 75 + 2

Unité d'occupation des terres	Groupe hydrologique attribué par unité géomorphologique numérotée de 1 à 43																
	CD-1	CD-1	C-D	CD-1	D	CD-1	A-B	B	B+1	B	B+1	B	B+1	A	C-D	A-B	B-C
16	83	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
AGRC	83	83	84	83	86	83	70	75	71	75	71	65	84	70	78		
RESERVOIR	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FRST	75	75	76	75	79	75	48	60	49	60	49	36	76	48	67		
PAST(c)	83	83	84	83	88	83	57	67	58	67	58	47	84	57	74		
PAST(a)	83	83	84	83	88	83	57	67	58	67	58	47	84	57	74		
PAST(b)	83	83	84	83	88	83	57	67	58	67	58	47	84	57	74		
RNGB	78	78	79	78	83	78	46	59	47	59	47	25	79	46	67		
RNGE	78	78	79	78	83	78	46	59	47	59	47	25	79	46	67		
SPAS(a)	78	78	79	78	83	78	46	59	47	59	47	25	79	46	67		
SPAS(b)	83	83	84	83	88	83	57	67	58	67	58	47	84	57	74		
URLD	90	90	91	90	92	90	77	84	78	84	78	72	91	77	87		
WATR	90	90	91	90	92	90	77	84	78	84	78	72	91	77	87		
WPAS	78	78	79	78	83	78	46	59	47	59	47	25	79	46	67		

Exemple: le CN attribué à une occupation agricole des terres (AGRC) qui couvre l'unité géomorphologique 16 est de 83, c'est-à-dire CD-1

Unité d'occupation des terres	Groupe hydrologique attribué par unité géomorphologique numérotée de 1 à 43													
	A	A-B	A	B-C	B-C	B-C	B+2	B+2	B+2	C+2	B-C	C-D	D	D
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	86
AGRC	65	70	65	78	78	78	77	77	84	84	78	84	86	86
RESERVOIR	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FRST	36	48	36	67	67	67	62	62	75	67	67	76	79	79
PAST(c)	47	57	47	74	74	74	69	69	83	74	84	88	88	88
PAST(a)	47	57	47	74	74	74	69	69	83	74	84	88	88	88
PAST(b)	47	57	47	74	74	74	69	69	83	74	84	88	88	88
RNGB	25	46	25	67	67	67	61	61	77	67	79	83	83	83
RNGE	25	46	25	67	67	67	61	61	77	67	79	83	83	83
SPAS(a)	25	46	25	67	67	67	61	61	77	67	79	83	83	83
SPAS(b)	47	57	47	74	74	74	69	69	83	74	84	88	88	88
URLD	72	77	72	87	87	87	86	86	91	87	91	92	92	92
WATR	72	77	72	87	87	87	86	86	91	87	91	92	92	92
WPAS	25	46	25	67	67	67	61	61	77	67	79	83	83	83



**ANNEXE IV-1: aptitude des terres du bassin versant de la  
Tolomosa**



## APTITUDE ET SALINITE

La salinité est mesurée sur un échantillon de sol de 100 gr mélangé à 100 ml d'eau distillée par la conductivité électrique dS/m des horizons jusqu'à 50 cm de profondeur.

Des échantillons saturés des profils étudiés dans le bassin ont été analysés directement sur le terrain en utilisant un conductivimètre. Une concentration de sels dans le sol supérieur à 4dS/m interfère avec le développement normal de la plante.

Tableau: aptitude et salinité (source: Zonisig, 2001)

Conductivité électrique CE (dS/m) (*)	Aptitude
< 2,0	Elevée
≥2,0 ≤ 4,0	Moyenne
>4,0 ≤ 8,0	Marginale
>8,0	Inapte

(\*) DeciSiemens par mètre

## APTITUDE ET ALCALINITE

L'alcalinité (présence de sodium) est représentée par le pourcentage de sodium échangeable (ESP). Le sodium est un agent dispersant qui affecte la structure et donc la perméabilité des sols. Il est toxique pour la majorité des plantes. Une quantité de 15% ou plus du total de la capacité d'échange cationique (CEC) a des conséquences négatives sur le développement de la majorité des plantes.

Dans cette étude, on considère la valeur mesurée la plus élevée obtenue jusqu'à 50 cm de profondeur de sol.

Tableau: aptitude et alcalinité du sol (source: Zonisig, 2001)

Sodium interchangeable (%)	Aptitude
< 6	Elevée
≥ 6 ≤ 10	Moyenne
> 10 ≤ 15	Marginale
> 15	Inapte

## APTITUDE ET DISPONIBILITE DE L'EAU DANS LE SOL

Cette qualité de la terre est déterminée à partir du bilan hydrique du sol établi par unité géomorphologique.

La précipitation mensuelle moyenne obtenue précédemment à partir des stations climatiques a permis le tracé des isohyètes du bassin versant. La pluie considérée est la pluie effective mensuelle moyenne et l'évapotranspiration est l'évapotranspiration potentielle (ET<sub>0</sub>) mensuelle moyenne. La profondeur considérée du sol pour le calcul de la disponibilité en eau est de 100 cm pour les cultures annuelles et prairies permanentes et de 150 cm pour les cultures pérennes et la sylviculture. La texture du sol provient des résultats de l'analyse des profils de sol.

La disponibilité de l'eau dans le sol pour la croissance des plantes est alors déterminée par la somme des mois de l'année sur la période humide (pluie effective ≥ 0,7.ET<sub>p</sub>) et la période subhumide (pluie effective ≥ 0,3.ET<sub>p</sub>). Le résultat est exprimé en nombre de mois avec une disponibilité en eau pour la croissance des plantes.

Tableau: aptitude et disponibilité en eau pour les plantes (source: Zonisig, 2001)

<b>Disponibilité en eau (mois)</b>	<b>Aptitude</b>
≥5	Elevée
≥4 et <5	Moyenne
≥3 et <4	Marginale
<3	Inapte

### **APTITUDE ET OXYGENE DANS LE SOL**

La disponibilité d'oxygène pour le développement racinaire et la croissance des plantes est liée à la classe de drainage du sol (FAO, 1990).

L'étude définit les classes de drainage en fonction de la texture et de la porosité des échantillons de sol analysés en laboratoire.

Tableau: aptitude et disponibilité en oxygène (source: Zonisig, 2001)

<b>Classe de drainage</b>	<b>Aptitude</b>
Drainage excessif, légèrement excessif, bon, moyen	Elevée
Drainage imparfait	Marginale
Drainage médiocre à très médiocre	Inapte

### **APTITUDE ET RISQUE D'INONDATION**

Les durées et fréquences des inondations ont été obtenues suite à des entrevues et des questions posées à la population locale. Suivant les possibilités, ces données ont été comparées avec les données de précipitation journalières des stations climatiques proches.

Tableau: aptitude et inondation (source: Zonisig, 2001)

<b>Durée de l'inondation (jour)</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Aptitude</b>
Sans inondation	Jamais	Elevée
De 1 à 15 jours	Une fois en moins de 5 ans	Elevée
De 15 à 90 jours	Annuelle	Marginale
Plus de 90 jours	Annuelle	Inapte

### **APTITUDE ET RESISTANCE A L'EROSION HYDRIQUE**

La résistance à l'érosion dépend d'un très grand nombre de facteurs tels que l'intensité des pluies, la texture du sol, la pente, la couverture végétale, etc.

Vu la complexité de l'interaction entre tous ces facteurs, l'étude estime la résistance à l'érosion sur la base de la pente, du degré d'érosion rencontré et la présence d'une couche contrastante formée par un changement brut de texture<sup>1</sup> sur une profondeur de 50 cm de sol ou un contact lithique à 10 ou 15 cm (FAO, 1990).

<sup>1</sup> Il y a changement brut de texture dans un profil si la différence en contenu d'argile est supérieure à 30% entre deux horizons adjacents

Tableau: aptitude et résistance à l'érosion hydrique (source: Zonisig, 2001; FAO, 1990)

Pente (%)	Couche contrastante	Aptitude
$0 \leq 2$	Sans changement brut de texture et sans contact lithique	Elevée
$0 \leq 2$	Avec changement brut de texture et/ou avec contact lithique	Elevée
$0 \leq 10$	Sans changement brut de texture et sans contact lithique	Elevée
$> 2 \leq 10$	Avec changement brut de texture et/ou avec contact lithique	Moyenne
$>10 \leq 15$	Sans changement brut de texture et sans contact lithique	Moyenne
$>10 \leq 15$	Avec changement brut de texture et/ou avec contact lithique	Marginale
$>15 \leq 30$	Sans changement brut de texture et sans contact lithique	Marginale
$>15 \leq 30$	Avec changement brut de texture et/ou avec contact lithique	Inapte
$>30 \leq 60$	Sans changement brut de texture et sans contact lithique	Inapte
$>30 \leq 60$	Avec changement brut de texture et/ou avec contact lithique	Inapte
$>60$	Sans changement brut de texture et sans contact lithique	Inapte

### PROFONDEUR EFFECTIVE DU SOL

La profondeur effective du sol est la profondeur maximum de sol où les racines des plantes ne rencontrent pas d'obstacles chimiques ni physiques à leur développement.

La profondeur effective a été mesurée sur le terrain pour chacun des profils étudiés.

Tableau: aptitude et profondeur effective du sol (source: Zonisig, 2001)

Profondeur (cm)	Aptitude
$>100$	Elevée
$> 50 \leq 100$	Elevée
$\geq 30 \leq 50$	Marginale
$< 30$	Inapte

### APTITUDE ET PERIODE DE GEL

Une période de temps est définie comme une période de gel si la température minimum est inférieure à  $0^{\circ}$  C. Le nombre de fois que la température minimum est inférieure à  $0^{\circ}$  C représente le nombre de jours de gel. La température est mesurée à la station climatique la plus proche.

Tableau: aptitude et périodes moyennes mensuelles de gel (source: Zonisig, 2001)

Mois totalement sans gel (nombre)	Mois sans gel plus 2 mois avec 1 à 4 jours de gel par mois (nombre)	Aptitude
$\geq 6$	---	Elevée
5	4 + 2	Elevée
4	3 + 2	Elevée
3	2 + 2	Moyenne
2	1 + 2	Marginale
$<2$	---	Inapte

La première colonne indique le nombre de mois totalement sans gel. La deuxième colonne exprime le nombre de mois sans gel plus 1 à 2 mois avec 1 à 4 jours de gel qui peuvent être supportés par la plante en fonction de son état de développement au moment du gel.

### APTITUDE ET PARCOURS DES TROUPEAUX

Le transit du bétail (bovin, ovin et caprin) en quête d'alimentation est lié à la facilité ou difficulté d'accès pour un terrain donné mesuré en fonction de la pente.

Tableau: aptitude pour le déplacement du bétail en fonction de la pente du terrain (source: Zonisig, 2001)

Pente du terrain (%)	Aptitude
≤ 30	Elevée
30 à 60	Moyenne
60 à 90	Marginale
>90	Inapte

### APTITUDE ET ALTITUDE POUR LE BÉTAIL

L'aptitude d'un écosystème vis-à-vis de l'élevage dépend de nombreux aspects dont, principalement, le type de végétation et l'altitude topographique. Les bovins et les caprins présentent une meilleure adaptation aux altitudes inférieures à 3.000 mètres, alors que les ovins s'adaptent indistinctement à des altitudes supérieures ou inférieures à 3.000 mètres. Les espèces natives comme le lama ne sont pas considérées car elles sont pratiquement inexistantes dans le bassin.

Tableau: aptitude et altitude pour bovins, ovins et caprins (source: Zonisig, 2001)

Altitude (m)	Aptitude
< 3.000	Elevée
3.000 à 3.500	Moyenne
> 3.500	Inapte

### APTITUDE ET QUALITE DU FOURRAGE

L'identification et la qualité du fourrage d'un pâturage sont déterminées des deux manières suivantes (Zonisig, 2001; PEA, 1999):

1. Sorties de terrain et relevés floristiques dont la détermination botanique a été faite sur place ou au laboratoire de l'université de Tarija.
2. Recueillir l'opinion des éleveurs quant à la qualité du fourrage pour les bovins, ovins et caprins.

Zonisig (2001) a effectué une analyse des plantes fourragères principales pour déterminer la qualité du fourrage en pourcentage de protéine crue (PC). Le projet a calculé la moyenne pondérée de la couverture consommable qui indique que les familles des légumineuses contiennent 15% de PC, des *Poaceae (Gramineae)*, *Cyperaceae* et *Juncaceae* 6% et le reste des familles 9%.

On suppose que, des espèces consommables, 100% sont consommés, tandis que des espèces modérément consommables, 50% sont consommables et, des espèces non consommables, rien n'est consommé. L'aptitude de la terre en fonction de la qualité du fourrage en considère les trois catégories suivantes:

1. Elevée: >70% du pâturage sont consommables
2. Moyenne: 20 à 70% du pâturage sont consommables
3. Marginale: <20% du pâturage sont consommables

En outre, Zonisig (2001) considère que, pour les arbustes et des arbres d'une hauteur comprise entre 3 et 6 m, seulement 50% sont consommables, alors que pour ceux d'une hauteur supérieure à 6 m, 10% seulement sont consommables.

Tableau: aptitude de la terre et qualité du fourrage (source: Zonisig, 2001)

Couverture avec espèces consommables (%)	Contenu en protéines crues (%)	Aptitude
>70	≥6	Elevée
> 50 ≤ 70	>9	Moyenne
> 50 ≤ 70	≥6	Moyenne
> 20 ≤ 50	>9	Moyenne
> 20 ≤ 50	≥6	Marginale
> 10 ≤ 20	>9	Marginale
> 10 ≤ 20	≥6	Inapte
≤ 10	≥6	Inapte

### APTITUDE ET DISPONIBILITE DE FOURRAGE FRAIS

Cette qualité est déterminée en fonction du nombre de mois de disponibilité en eau pour la croissance des plantes et la production de fourrage (Zonisig, 2001).

Tableau: aptitude et disponibilité en fourrage frais pour le bétail (source: Zonisig, 2001)

Disponibilité de fourrage frais (mois)	Aptitude
>9	Elevée
>8 ≤ 9	Moyenne
> 6 ≤ 8	Inapte (*)
≤6	Inapte

(\*) Marginale pour les ovins et caprins

### APTITUDE ET COUVERTURE VEGETALE

L'aptitude d'un écosystème vis-à-vis de l'élevage dépend de nombreux aspects dont, principalement, le type de végétation et l'altitude topographique. Par exemple, les bovins et les caprins pratiquent l'abrutage dans les zones broussailleuses (matorral) alors que les ovins ne le font pas.

Tableau: aptitude pour les ovins et bovins en fonction de la couverture végétale (source: Zonisig, 2001)

Couverture végétale	Aptitude	
	Bovin et ovin	Caprin
Pâturage avec graminée ou végétation herbacée dense à très dense	Elevée	Elevée
Pâturage avec graminée ou végétation herbacée semi-dense	Moyenne	Elevée
Pâturage avec graminée ou végétation herbacée claire ou ouverte	Marginale	Moyenne
Broussaille claire	Inapte	Marginale
Broussaille épineuse de semi-dense à très dense	Inapte	Inapte
Forêt claire à semi-dense	Inapte	Inapte
Forêt dense à très dense	Inapte	Inapte
Tout type de végétation dispersée	Inapte	Inapte

### APTITUDE ET DISPONIBILITE DE BOIS COMMERCIAL

Le calcul du volume de production de bois par hectare se base sur le diamètre minimum de coupe de la norme bolivienne (résolution ministérielle 248/98; Ministère du développement). Comme la plupart des arbres du bassin versant sont abattus avant d'atteindre le diamètre fixé par cette norme, on considère que le diamètre moyen pour la commercialisation des arbres est de 15 cm environ.

Tableau: aptitude et disponibilité en bois commercial (source: Zonisig, 2001)

<b>Volume (m<sup>3</sup>/ha)</b>	<b>Aptitude</b>
≥ 60	Elevée
60 à 30	Moyenne
30 à 20	Marginale
< 20	Inapte

## **ANNEXE IV-2: base de données par propriété agricole**



ID	Propriété	Prix (USD)	Superficie (m2)	Périmètre (m)	Coor.X	Coor.Y	Pente (%)	Aptitude agricole	Classe occup. terres		Forme pente	Drainage	Profondeur effective (cm)	Perméabilité
									(SWAT)					
<b>SUBCUENCA TOLOMOSA A</b>														
<b>TOLOMOSA NORTE</b>														
1	Propriété 2	1500	4198.436	260.229	313469	7608367	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
2	Propriété 13	2.000	4523.586	297.409	313494	7608394	1	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
3	Propriété 1	4.000	7963.337	380.532	313835	7608345	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
4	Propriété 3	2.500	6828.638	354.673	314307	7608900	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
5	Propriété 4	5.000	13046.429	465.214	314424	7608636	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
6	Propriété 5	5.000	11334.160	433.912	314408	7608743	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
7	Propriété 7	5.000	6435.272	375.272	315889	7608927	1	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
8	Propriété 8	5.000	5643.490	374.342	316165	7608907	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
9	Propriété 11	7.000	14292.929	545.682	317255	7608843	5	Marginele	WPAS	GEbc	Convexe	Excessif	50 - 100	Modérém. rapide
10	Propriété 9	1.000	10152.785	408.649	315309	7608470	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
11	Propriété 12	7.000	12028.997	417.870	315274	7608348	2	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
12	Propriété 10	2.000	8546.196	388.017	315630	7608435	2	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
13	Propriété 6	5.000	15924.064	517.341	314543	7608693	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Lég. excessif	50 - 100	Modérém.lente
0	Ecole		4459.531	270.952	315381	7608989								
0	Poste sanitaire													
<b>TOLOMOSA CENTRO</b>														
1	Propriété 1	50.000	5432.837	305.560	318755	7610899	5	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
2	Propriété 2	30.000	5865.415	308.607	318829	7610989	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
3	Propriété 3	40.000	4900.652	308.935	318807	7610738	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
4	Propriété 4	40.000	8455.191	402.413	319027	7610787	4	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
5	Propriété 5	10.000	7165.995	348.682	319146	7610814	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
6	Propriété 6	80.000	4419.694	281.247	319227	7610830	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
7	Propriété 7	80.000	6195.540	300.425	319310	7610878	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
8	Propriété 8	7.500	5120.274	306.700	319418	7610976	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
9	Propriété 9	30.000	4450.999	276.979	319444	7610852	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
10	Propriété 10	30.000	4035.497	265.416	319734	7611063	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
11	Propriété 11	30.000	4425.386	268.168	319613	7610865	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
12	Propriété 12	5.000	8981.683	361.025	317990	7611626	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
0	Ecole													
0	Poste sanitaire													
<b>TOLOMOSA OESTE</b>														
1	Propriété 6	3.500	4705.189	274.313	315594	7610828	2	Marginele	WPAS	GEb	Terrasse	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
2	Propriété 1	2.500	7295.833	389.371	315515	7610798	1	Marginele	WPAS	GEb	Terrasse	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
3	Propriété 8	3.500	12764.817	451.967	315363	7611128	2	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
4	Propriété 5	2.000	18494.285	564.558	315429	7611200	3	Marginele	WPAS	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
5	Propriété 3	2.000	15110.448	520.021	315903	7611074	5	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
6	Propriété 2	3.000	9741.489	423.843	316192	7611088	2	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
7	Propriété 7	3.000	22093.190	554.274	316914	7611147	3	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
8	Propriété 4	3.000	20592.357	566.216	316716	7611186	2	Moyenne	AGRC	GEo	Droite	Bon	<30 cm	Modérém. rapide
0	Ecole													
0	Poste sanitaire													
<b>GUERRAHUAYCO</b>														
1	Propriété 8	12.500	7329.364	355.985	312057	7610970	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
2	Propriété 5	3.000	18705.921	534.923	313208	7610930	3	Marginele	RNGE	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
3	Propriété 1	4.000	13404.261	491.657	313495	7611276	3	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
4	Propriété 7	3.000	14741.617	484.797	312228	7611423	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
5	Propriété 2	48.000	8538.289	371.165	312379	7611460	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
6	Propriété 4	4.500	14987.254	490.063	312395	7611793	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
7	Propriété 6	1.000	20473.141	585.493	312742	7612530	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
8	Propriété 3	3.000	13718.131	479.648	312626	7612217	2	Marginele	AGRC	GEo-mp	Droite	Imparfat	50 - 100	Modérém.lente
9	Propriété 2 Turunma	2.000	12947.104	488.658	315682	7615786	2	Marginele	AGRC	GEb	Terrasse	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
10	Propriété 1 Turunma	40.000	3722.079	244.314	315571	7615776	2	Marginele	AGRC	GEb	Terrasse	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
<b>MOLINOS</b>														
1	Propriété 1	2.000	9035.231	356.683	311076	7608700	2	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
2	Propriété 2	3.000	8422.088	358.041	311143	7608760	2	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
3	Propriété 6	3.000	9304.642	402.310	311097	7608110	3	Moyenne	WPAS	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
4	Propriété 3	1.500	6718.029	339.808	311255	7608157	2	Moyenne	RNGE	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
5	Propriété 5	6.000	5516.959	321.219	311299	7608193	2	Moyenne	RNGE	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
6	Propriété 4	1.500	12351.776	441.429	311373	7608108	3	Moyenne	RNGE	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
<b>SAN ANDRES</b>														
1	Propriété 2	100.000	10159.710	459.925	311863	7607987	2	Moyenne	RNGE	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
2	Propriété 3	4.500	7326.417	340.621	310859	7608278	2	Marginele	WPAS	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exce. lente
3	Propriété 4	10.000	7882.267	362.732	311329	7608663	2	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
4	Propriété 1	4.000	11989.384	469.447	311543	7608718	2	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
5	Propriété 5	6.000	6971.055	333.662	311142	7607927	2	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
6	Propriété 6	6.000	9805.441	419.069	311232	7607888	2	Moyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfat	100 - 150	Modérém.lente
<b>SOLA</b>														
1	Propriété 2	1.500	7931.605	356.607	308961	7607435	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
2	Propriété 5	1.200	9144.887	382.705	308887	7607491	3	Marginele	WPAS	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
3	Propriété 4	3.000	10068.430	413.962	309162	7607515	3	Marginele	WPAS	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
4	Propriété 6	3.730	10151.730	413.737	309093	7607570	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
5	Propriété 3	2.000	13945.536	474.373	308690	7607801	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
6	Propriété 1	3.800	14853.894	503.932	308536	7607868	3	Marginele	AGRC	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
7	Propriété 7	3.000	12104.199	448.273	0	0	3	Marginele	WPAS	GEo-mp	Convexe	Bon	50 - 100	Modérém. rapide
0														

ID	Propriété	Degré d'érosion	Distance école (m)	Accès élect.	Accès eau pot.	Eau irrigation	Qualité eau potable	Qualité eau irrigation	Incendie
<b>SUBCUENCA TOLOMOSA A</b>									
<b>TOLOMOSA NORTE</b>									
1	Propriété 2	Sans ou érosion légère	2000m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 13	Sans ou érosion légère	1900 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 1	Sans ou érosion légère	1600 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 3	Sans ou érosion légère	1100 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 4	Sans ou érosion légère	990 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 5	Sans ou érosion légère	980 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
7	Propriété 7	Sans ou érosion légère	500 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
8	Propriété 8	Sans ou érosion légère	800 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
9	Propriété 11	Erosion extrême	1850 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
10	Propriété 9	Sans ou érosion légère	450 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
11	Propriété 12	Sans ou érosion légère	580 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
12	Propriété 10	Sans ou érosion légère	540 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
13	Propriété 6	Sans ou érosion légère	850 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
0	Ecole		Primaire						
0	Poste sanitaire								
<b>TOLOMOSA CENTRO</b>									
1	Propriété 1	Erosion extrême	950 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 2	Erosion extrême	1060 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 3	Erosion extrême	810 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 4	Erosion extrême	930 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 5	Erosion extrême	1000 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 6	Erosion extrême	1070 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
7	Propriété 7	Erosion extrême	1150 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
8	Propriété 8	Erosion extrême	1300 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
9	Propriété 9	Erosion extrême	1210 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
10	Propriété 10	Erosion extrême	1570 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
11	Propriété 11	Erosion extrême	1410 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
12	Propriété 12	Erosion extrême	1800 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
0	Ecole		Primaire						
0	Poste sanitaire								
<b>TOLOMOSA OESTE</b>									
1	Propriété 6	Erosion extrême	960 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 1	Erosion extrême	1040 m	Si	Si	Non	A	/	Bas
3	Propriété 8	Sans ou érosion légère	1100 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 5	Sans ou érosion légère	1030 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 3	Sans ou érosion légère	580 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 2	Sans ou érosion légère	310 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
7	Propriété 7	Sans ou érosion légère	450 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
8	Propriété 4	Sans ou érosion légère	250 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
0	Ecole		Primaire						
0	Poste sanitaire								
<b>GUERRAHUAYCO</b>									
1	Propriété 8	Sans ou érosion légère	2600 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
2	Propriété 5	Erosion sévère en proces. de stabil.	2250 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
3	Propriété 1	Erosion sévère en proces. de stabil.	1800 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
4	Propriété 7	Sans ou érosion légère	2100 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
5	Propriété 2	Sans ou érosion légère	2000 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
6	Propriété 4	Sans ou érosion légère	1700 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
7	Propriété 6	Erosion légère à modérée	950 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
8	Propriété 3	Erosion légère à modérée	1250 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
9	Propriété 2 Turumay	Erosion légère à modérée	720 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
10	Propriété 1 Turumay	Erosion légère à modérée	830 m	Si	Si	Si	A	A	Modéré
<b>MOLINOS</b>									
1	Propriété 1	Erosion sévère en proces. de stabil.	1110 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 2	Erosion sévère en proces. de stabil.	1070 m	Si	Non	Si	/	A	Bas
3	Propriété 6	Sans ou érosion légère	1050 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 3	Sans ou érosion légère	880 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 5	Sans ou érosion légère	820 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 4	Erosion sévère en proces. de stabil.	780 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
<b>SAN ANDRES</b>									
1	Propriété 2	Erosion sévère en proces. de stabil.	420 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 3	Sans ou érosion légère	1250 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 4	Erosion sévère en proces. de stabil.	850 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 1	Erosion sévère en proces. de stabil.	700 m	Si	Non	Si	/	A	Bas
5	Propriété 5	Erosion sévère en proces. de stabil.	1050 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 6	Erosion sévère en proces. de stabil.	930 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
<b>SOLA</b>									
1	Propriété 2	Sans ou érosion légère	1200 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 5	Sans ou érosion légère	1150 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 4	Sans ou érosion légère	1400 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 6	Sans ou érosion légère	1400 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 3	Sans ou érosion légère	1230 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 1	Sans ou érosion légère	1200 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
7	Propriété 7	Sans ou érosion légère	1450 m	Si	Si	Si	A	A	Bas

ID	Propriété	Prix (USD)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Périmètre (m)	Coor.X	Coor.Y	Pente (%)	Aptitude agricole	Classe occup terres		Forme pente	Drainage	Profondeur effective (cm)	Perméabilité
									(SWAT)					
<b>SUB CUENCA MENA</b>														
<b>TOLOMOSA GRANDE</b>														
1	Propriété 1	6.000	6248.059	345.989	316578	767172	2	Mbyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
2	Propriété 3	5.000	416.272	82.926	316597	767363	1	Mbyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
3	Propriété 9	4.000	25661.719	611.730	316839	767153	10	Marginale	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
4	Propriété 2	6.000	13209.349	457.864	316509	767244	2	Mbyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
5	Propriété 6	4.000	3560.984	253.592	316160	767649	1	Mbyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
6	Propriété 8	4.000	7801.397	375.967	315951	767815	2	Mbyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
7	Propriété 7	4.000	9055.177	385.752	315931	767937	1	Mbyenne	AGRC	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
8	Propriété 5	5.000	8981.624	388.768	317213	767904	2	Marginale	AGRC	GEo-mp	Droite	Médocre	50 - 100	Exca. lente
9	Propriété 4	1.000	15267.051	475.085	315682	766013	5	Mbyenne	WPAS	AA1	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
0	Colegio													
0	Poste sanitaire													
<b>PAMPA REDONDA</b>														
1	Propriété 3	38.000	2049.210	183.462	311341	7599158	1	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Lég. excessif	>150	Modérément
2	Propriété 1	40.000	2866.573	232.985	311539	7599465	1	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Lég. excessif	>150	Modérément
3	Propriété 2	50.000	2775.512	230.550	311615	7599580	1	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Lég. excessif	>150	Modérément
4	Propriété 5	40.000	7157.644	338.857	311687	7599719	1	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Lég. excessif	>150	Modérément
5	Propriété 4	500	93345.689	1235.546	312119	7599896	1	Marginale	WPAS	GEbc	Convexe	Bon	30 - 50	Modérément
6	Propriété 6	110.000	2585.830	226.191	311521	7599422	1	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Lég. excessif	>150	Modérément
7	Propriété 7	9.300	1176.999	141.541	311478	7599310	1	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Lég. excessif	>150	Modérément
0	Colegio													
0	Centro Salud													
<b>SUBCUENCA PINOS</b>														
<b>PINOS SUD Y PINOS NORTE</b>														
1	Propriété 1	1.000	16787.193	520.034	305708	7594483	2	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
2	Propriété 2	1.500	14447.706	474.911	305964	7594686	2	Mbyenne	AGRC	AA1m	Droite	Imparfait	100 - 150	Lente
3	Propriété 1 pn	500	10754.601	418.826	307297	7599866	2	Marginale	WPAS	GE	Droite	Bon	>150	Modérément
4	Propriété 2 pn	600	13207.542	471.361	307009	7599269	2	Marginale	WPAS	GE	Droite	Bon	>150	Modérément
0	Ecole ps		2906.755	224.166	306033	7595336	2							
0	Ecole pn													
<b>BELLA VISTA</b>														
1	Propriété 5	309	9915.943	402.048	307459	7605716	2	Marginale	AGRC	GEo-mp	Droite	Bon	50 - 100	Modérément rapide
2	Propriété 4	3.300	25010.610	633.258	307503	7605478	2	Marginale	AGRC	GEo-mp	Droite	Bon	50 - 100	Modérément rapide
3	Propriété 3	1.067	9074.699	408.497	308084	7604962	2	Marginale	AGRC	GEo-mp	Droite	Bon	50 - 100	Modérément rapide
4	Propriété 2	3.000	33625.906	764.640	308209	7604791	2	Marginale	AGRC	GEo-mp	Droite	Bon	50 - 100	Modérément rapide
5	Propriété 1	1.300	20142.132	691.895	308240	7604428	2	Marginale	AGRC	GEo-mp	Droite	Bon	50 - 100	Modérément rapide

ID	Propriété	Degré d'érosion	Distance école (m)	Accès élect.	Accès eau pot.	Eau irrigation	Qualité eau potable	Qualité eau irrigation	Incendie
<b>SUB CUENCA MENA</b>									
<b>TOLOMOSA GRANDE</b>									
1	Propriété 1	Erosion sévère en proces. de stabil.	520 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 3	Erosion sévère en proces. de stabil.	340 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 9	Sans ou érosion légère	640 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 2	Erosion sévère en proces. de stabil.	450 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 6	Erosion sévère en proces. de stabil.	300 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 8	Erosion sévère en proces. de stabil.	560 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
7	Propriété 7	Erosion sévère en proces. de stabil.	500 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
8	Propriété 5	Sans ou érosion légère	820 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
9	Propriété 4	Erosion sévère en proces. de stabil.	1850 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
0	Colegio		Secundaria						
0	Poste sanitaire								
<b>PAMPA REDONDA</b>									
1	Propriété 3	Erosion sévère en proces. de stabil.	20 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 1	Erosion sévère en proces. de stabil.	400 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 2	Erosion sévère en proces. de stabil.	510 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 5	Erosion sévère en proces. de stabil.	660 m	Si	Non	Si	/	A	Bas
5	Propriété 4	Erosion sévère en proces. de stabil.	1100 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
6	Propriété 6	Erosion sévère en proces. de stabil.	320 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
7	Propriété 7	Erosion sévère en proces. de stabil.	200 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
0	Colegio		Secundaire						
0	Centro Salud								
<b>SUBCUENCA PINOS</b>									
<b>PINOS SUD Y PINOS NORTE</b>									
1	Propriété 1	Erosion sévère en proces. de stabil.	930 m	Si	Si	Non	A	A	Moderado
2	Propriété 2	Erosion sévère en proces. de stabil.	650 m	Si	Non	Non	/	/	Moderado
3	Propriété 1 pn	Sans ou érosion légère	515 m	Si	Non	Non	/	/	Moderado
4	Propriété 2 pn	Sans ou érosion légère	1200 m	Si	Si	Non	A	A	Moderado
0	Ecole ps		Primaire						
0	Ecole pn		Primaire						
<b>BELLA VISTA</b>									
1	Propriété 5	Sans ou érosion légère	2420 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
2	Propriété 4	Sans ou érosion légère	2300 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
3	Propriété 3	Sans ou érosion légère	1700 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
4	Propriété 2	Sans ou érosion légère	1500 m	Si	Si	Si	A	A	Bas
5	Propriété 1	Sans ou érosion légère	700 m	Si	Si	Si	A	A	Bas



**ANNEXE IV-3: output du logiciel LIMDEP7 de l'équation des prix hédoniques**



## Forme fonctionnelle sans restriction

```

+-----+
| Box-Cox Nonlinear Regression Model
| Maximum likelihood estimator      Heteroscedasticity:W(i) = ONE
| Number of iterations completed = 26
| Dep. var. = PRECIO2 Mean= 13.28857471 , S.D.= 22.42071455
| Model size: Observations = 87, Parameters = 12, Deg.Fr.= 75
| Residuals: Sum of squares= 36.04932052 , Std.Dev.= .64371
| Fit: R-squared= .999176, Adjusted R-squared = .99919
| (Note: Not using OLS. R-squared is not bounded in [0,1]
| Model test: F[ 11, 75] = 8264.78, Prob value = .00000
| Diagnostic: Log-L = -85.1233, Restricted(b=0) Log-L = -393.5135
| LogAmemiyaPrCrt.= -.752, Akaike Info. Crt.= 2.233
| Transformations: RHS = Lambda , LHS = Theta
| Elasticities have been kept in matrix EPSILON
| Log-likelihood accounting for the LHS transformation = -242.59026
+-----+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|Variable | Coefficient | Standard Error |b/St.Er.|P[|Z|>z] | Mean of X|
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
Variables transformed by LAMBDA = -.06215
TAMANO -.2588540637 .99412709E-01 -2.604 .0092 1.6975977
Z -.2909622043E-01 .16940457 -.172 .8636 .23218391E-01
Variables that were not transformed
PROFEFEC -.8373773231 .37411555 -2.238 .0252 .89655172
DREIN -.3517169700 .25695376 -1.369 .1711 .59770115
EROSA -.8727829456 .20884829 -4.179 .0000 .54022989
APTAGRI -.9332213832 .28713695 -3.250 .0012 .40229885
USAC .3722922897 .18099738 2.057 .0397 .79310345
RIEGO -.1201791532 .23932930 -.502 .6156 .83908046
ENEL .9232221078 .20527735 4.497 .0000 .56321839
AGUAPOT .1112362741 .18846227 .590 .5550 .60919540
INCEN -.3719555944 .20126832 -1.848 .0646 .16091954
Constant 2.413322681 .99360253 2.429 .0151
Variance and transformation parameters
Lambda -.6214624260E-01 .17599817 -.353 .7240
Theta -.9164466386E-01 .63351523E-01 -1.447 .1480

```

**Forme fonctionnelle avec la restriction ( $\theta = \lambda$ )**

```

+-----+
| Box-Cox Nonlinear Regression Model
| Maximum likelihood estimator      Heteroscedasticity:W(i) = ONE
| Number of iterations completed = 23
| Dep. var. = PRECIO2 Mean= 13.28857471 , S.D.= 22.42071455
| Model size: Observations = 87, Parameters = 12, Deg.Fr.= 75
| Residuals: Sum of squares= 36.35694011 , Std.Dev.= .64645
| Fit: R-squared= .999169, Adjusted R-squared = .99918
| (Note: Not using OLS. R-squared is not bounded in [0,1]
| Model test: F[ 11, 75] = 8194.80, Prob value = .00000
| Diagnostic: Log-L = -85.4929, Restricted(b=0) Log-L = -393.5135
| LogAmemiyaPrCrt.= -.743, Akaike Info. Crt.= 2.241
| Transformations: RHS = Lambda , LHS = Lambda
| Elasticities have been kept in matrix EPSILON
| Log-likelihood accounting for the LHS transformation = -242.60374
+-----+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|Variable | Coefficient | Standard Error |b/St.Er.|P[|Z|>z] | Mean of X|
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
Variables transformed by LAMBDA = -.08918
TAMANO -.2524455861 .92016554E-01 -2.743 .0061 1.6975977
Z -.3043100198E-01 .15342555 -.198 .8428 .23218391E-01
Variables that were not transformed
PROFEFEC -.8291512715 .37179153 -2.230 .0257 .89655172
DREIN -.3449774089 .25438618 -1.356 .1751 .59770115
EROSA -.8783284266 .20707501 -4.242 .0000 .54022989
APTAGRI -.9339899539 .28817964 -3.241 .0012 .40229885
USAC .3732424606 .18163474 2.055 .0399 .79310345
RIEGO -.1181121191 .24017590 -.492 .6229 .83908046
ENEL .9262724892 .20559789 4.505 .0000 .56321839
AGUAPOT .1127927222 .18911153 .596 .5509 .60919540
INCEN -.3736160649 .20192042 -1.850 .0643 .16091954
Constant 2.385791838 .95777282 2.491 .0127
Variance and transformation parameters
Lambda -.8917568429E-01 .61822554E-01 -1.442 .1492

```

**Forme fonctionnelle double log. avec la restriction ( $\theta = \lambda = 0$ ) avec la variane ENEL**

```

+-----+
| Ordinary least squares regression Weighting variable = none
| Dep. var. = LNPRECIO Mean= 1.658012297 , S.D.= 1.288020686
| Model size: Observations = 87, Parameters = 12, Deg.Fr.= 75
| Residuals: Sum of squares= 50.07748118 , Std.Dev.= .81713
| Fit: R-squared= .649007, Adjusted R-squared = .59753
| Model test: F[ 11, 75] = 12.61, Prob value = .00000
| Diagnostic: Log-L = -99.4210, Restricted(b=0) Log-L = -144.9650
| LogAmemiyaPrCrt.= -.275, Akaike Info. Crt.= 2.561
| Autocorrel: Durbin-Watson Statistic = 1.70233, Rho = .14883
| Results Corrected for heteroskedasticity
| Breusch - Pagan chi-squared = 22.1514, with 11 degrees of freedom
+-----+

```

Variable	Coefficient	Standard Error	t-ratio	P[ T >t]	Mean of X
LNTAMANO	<b>-0.3671571995</b>	.88198671E-01	<b>-4.163</b>	.0001	-.23763567E-01
LNZ	<b>.1054251523E-01</b>	.18854688	<b>.056</b>	.9556	-3.8739302
PROFEFEC	<b>-1.037187207</b>	.39362013	<b>-2.635</b>	.0102	.89655172
DREIN	<b>-.4343685205</b>	.36782229	<b>-1.181</b>	.2414	.59770115
EROSA	<b>-1.037106274</b>	.21064075	<b>-4.924</b>	.0000	.54022989
APTAGRI	<b>-1.124547112</b>	.32952793	<b>-3.413</b>	.0010	.40229885
USAC	<b>.4029098805</b>	.20485087	<b>1.967</b>	.0529	.79310345
RIEGO	<b>-.2000368322</b>	.33261517	<b>-.601</b>	.5494	.83908046
ENEL	<b>1.114246608</b>	.18648896	<b>5.975</b>	.0000	.56321839
AGUAPOT	<b>.6532024400E-01</b>	.24790938	<b>.263</b>	.7929	.60919540
INCEN	<b>-.3906224129</b>	.36288712	<b>-1.076</b>	.2852	.16091954
Constant	<b>3.136122244</b>	.99960546	<b>3.137</b>	.0024	

**Forme fonctionnelle double log. avec la restriction ( $\theta = \lambda = 0$ ) sans la variable ENEL**

```

+-----+
| Ordinary least squares regression Weighting variable = none
| Dep. var. = LNPRECIO Mean= 1.658012297 , S.D.= 1.288020686
| Model size: Observations = 87, Parameters = 11, Deg.Fr.= 76
| Residuals: Sum of squares= 68.03871874 , Std.Dev.= .94617
| Fit: R-squared= .523117, Adjusted R-squared = .46037
| Model test: F[ 10, 76] = 8.34, Prob value = .00000
| Diagnostic: Log-L = -112.7540, Restricted(b=0) Log-L = -144.9650
| LogAmemiyaPrCrt.= .008, Akaike Info. Crt.= 2.845
| Autocorrel: Durbin-Watson Statistic = 2.01638, Rho = -.00819
| Results Corrected for heteroskedasticity
| Breusch - Pagan chi-squared = 19.5986, with 10 degrees of freedom
+-----+

```

Variable	Coefficient	Standard Error	t-ratio	P[ T >t]	Mean of X
LNTAMANO	<b>-.3544809453</b>	.11164942	<b>-3.175</b>	.0022	-.23763567E-01
LNZ	<b>-.2068623951</b>	.22923258	<b>-.902</b>	.3697	-3.8739302
PROFEFEC	<b>-.8975869082</b>	.46576675	<b>-1.927</b>	.0577	.89655172
DREIN	<b>-.4815753910</b>	.39177043	<b>-1.229</b>	.2228	.59770115
EROSA	<b>-1.154551555</b>	.25725046	<b>-4.488</b>	.0000	.54022989
APTAGRI	<b>-1.094552225</b>	.35968114	<b>-3.043</b>	.0032	.40229885
USAC	<b>.5897450296</b>	.21827002	<b>2.702</b>	.0085	.79310345
RIEGO	<b>.1209266775</b>	.38061888	<b>.318</b>	.7516	.83908046
AGUAPOT	<b>.6527217845</b>	.23430751	<b>2.786</b>	.0067	.60919540
INCEN	<b>-.4971846919</b>	.36327268	<b>-1.369</b>	.1751	.16091954
Constant	<b>2.118025282</b>	1.1765384	<b>1.800</b>	.0758	

**ANNEXE IV-4: essences choisies pour le scénario de  
développement sylvo-pastoral**



**TABLEAU:** essences forestières fourragères et utiles à l'homme recommandées pour le scénario sylvo-pastoral (source: Casal et al., 2003; Brozovich, 2000; PERTT, 1993) – Bassin de la Tolomosa

Nom commun	Nom scientifique	Etage écologique	Usage	Caractéristique écologique
Jaúl ou Aliso	<i>Alnus acuminata</i>	Surtout montagnoux Subalpin	Usage sylvo-pastoral en général Bois de chauffe Construction (charpente, coffrage) Manches pour outils ; pieux pour vigne; boîtes pour bougies Ebénisterie Médicinale Fonction fourragère pour les animaux en élevage extensif	Pousse spontanément à une altitude de 2.200 à 2.950 m environ Exigeant en humidité du sol avec un climat froid semi-aride à froid semi-humide et précipitations de 600 à 900 mm/an Croissance rapide, tronc droit et se reproduit bien par bouture Présent sur sols superficiels à modérément profonds avec présence de pierriers Favorise la présence de matières organiques et la fertilité du sol (présence d'azote)
Guaraguay	<i>Tecota stans</i>	Surtout montagnoux Subalpin	Usage sylvo-pastoral en général Bois de chauffe Fonction fourragère pour les animaux en élevage extensif	Apte à une altitude de 2.000 à 2.950 m environ, avec un climat froid semi-humide et précipitations de 750 à 900 mm/an Bonne protection des sols contre l'érosion
Jarca	<i>Acacia visco</i>	Montagnoux	Très bon usage sylvo-pastoral: le fruit, les feuilles et les fleurs sont comestibles (arbre fourragère; légumineuse) Bois de chauffe Charbon de bois Bois de construction, manches pour outils; pieux pour vigne	Pousse à une altitude de 1.900 à 2.750 m, avec un climat froid semi-aride à tempéré aride et des précipitations de 500 à 650 mm/an Présent sur sols superficiels à profonds avec présence pierriers sur des pentes jusqu'à 60% Favorise la présence de matières organiques et la fertilité du sol (présence d'azote)
Pin des montagnes	<i>Podocarpus parlatorei</i>	Subalpin	Bois de chauffe Construction de maisons, de boîtes pour le transport de fruits (bois légers), meubles et fauteuils	Pousse à une altitude de 2.000 à 3.000 m, avec un climat froid semi-humide et des précipitations de 800 à 1.500 mm/an Présent sur sols modérément profonds avec présence de pierriers sur des pentes jusqu'à 60%
Eucalyptus	<i>Eucalyptus</i>		Arbre mellifère (odeur camphrée) Bois de coffrage Bois de construction	Se rencontre à une altitude de 1.820 à 2.050 m Croissance rapide Exigeant en eau



