

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER II

--- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC ---

T H E S E

présentée à l'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II - SCIENCES ET TECHNIQUES DU
LANGUEDOC - pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

SPÉCIALITÉ : Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil

Formation Doctorale : Hydrologie et sciences de l'eau

**HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS DU
NORDESTE BRÉSILIEN
SEMI-ARIDE**

par

Eric CADIER

Soutenue le 28 novembre 1991 devant le Jury composé de:

MM.	C.	BOCQUILLON, Professeur, Université Montpellier II	Président
	M.S.	CAMPELLO, Professeur Recife, Brésil	Rapporteur
	J.F.	NOUVELOT, Directeur de Recherche de l'ORSTOM	
	J.C.	LEPRUN, Directeur de Recherche de l'ORSTOM	Rapporteur
	B.	POUYAUD, Directeur de Recherche de l'ORSTOM	

HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS DU NORDESTE SEMI-ARIDE BRESILIEN

SOMMAIRE

Avant-Propos.....	3
Résumé	5
Introduction.....	9
1. Contexte naturel et histoire de l'hydrologie des petits bassins.....	11
1.1 Contexte naturel du nordeste du Brésil.....	11
1.2 Histoire de l'hydrologie des petits bassins du nordeste.....	29
2. Techniques hydrologiques utilisées	45
2.1 Problématique et spécificité de l'hydrologie des petits bassins	45
2.2 Concepts et schémas actuels de l'hydrologie des petits bassins : résumé bibliographique.....	53
2.3 Techniques d'étude utilisées dans le Nordeste Brésilien	57
3. Description des Bassins Versants Représentatifs du Nordeste brésilien.....	77
3.1 Le bassin représentatif de TAUA	78
3.2 Le bassin représentatif de SUME.....	98
3.3 Le bassin représentatif du RIACHO DO NAVIO	121
3.4 Le bassin représentatif de JUATAMA	139
3.5 Le bassin représentatif d'IBIPEBA	151
3.6 Conclusion de la troisième partie:.....	164
4. Transposition des écoulements annuels	167
4.1 Objectifs et stratégie	167
4.2 Modélisation hydrologique des petits bassins versants représentatifs du "Nordeste"	170
4.3 Choix des pluviomètres pour la transposition spatiale.....	190
4.4 L'abattement des pluies.....	209
4.5 Typologie des bassins.....	214
4.6 Utilisation des données du réseau général.....	246
5. Transposition des caractéristiques des crues.....	285
5.1 Revue bibliographique.....	286
5.2 Méthode, objectifs et stratégie.....	289
5.3 Information disponible	291
5.4 Formules proposées pour la transposition des crues pour les zones cristallines.....	294
5.5 Discussion : les facteurs correctifs des crues.....	302
6. Conclusion générale.....	311
ANNEXES	
Annexe 1 : Méthode de transposition hydrologique, proposée dans le "Manuel du Petit Açude".....	325
Annexe 2 : Information existante sur les autres bassins représentatifs	345
Annexe 3 : Liste et qualité des pluviomètres sélectionnés	361
Annexe 4 : Fonctionnement du Modèle SUDENE/ORSTOM avec des pluviométries africaines.....	367
Annexe 5 : Glossaire.....	371
Bibliographie	373
Table des Matières	387
Liste des Figures.....	391
Liste des Tableaux.....	395

AVANT-PROPOS

Ce travail est avant tout le résultat d'une oeuvre collective, qui tente la synthèse de près de trente ans de collaboration entre l'ORSTOM et la Surintendance pour le Développement du Nordeste du Brésil (SUDENE).

Il faut reconnaître l'apport de tous. La très longue liste des intervenants témoigne de la diversité et de l'importance des contributions.

- * Citons, tout d'abord, l'équipe pionnière qui a réalisé les premières études de petits bassins dans le Val du Jaguaribe : MM. DUBREUIL, CAMPELLO, HERBAUD, GIRARD et LEDUC. Sans la qualité de leur travail, ce programme de coopération se serait arrêté en ... 1966 !
- * Remercions les dirigeants de la SUDENE et de l'ORSTOM, qui n'ont pas ménagé leur appui à ce programme, en lui allouant les ressources humaines et financières nécessaires: MM. José Luis Peres GARRIDO et Leonides Alves de SOUZA, Directeurs de la Planification Globale à la SUDENE, MM. DUBREUIL, POUYAUD et MONIOD, responsables de l'ORSTOM, MM. S. CAMPELLO, G. GUSMÃO et M. BARROS, Coordinateurs du programme des Ressources Naturelles de la SUDENE et tous les responsables qui se sont succédés à la tête de l'équipe chargée d'étudier les bassins versants représentatifs: MM. Benedito ZELAQUETT, P. A. SANGUINETTI et Humberto VIEIRA.
- * Les hydrologues français ou brésiliens qui ont tous apporté leur contribution, leurs idées et partagé le poids de ces études: J. F. NOUVELOT, mon prédécesseur, qui a été le véritable fondateur de ce programme, M. S. CAMPELLO, qui y aura consacré sa thèse, J. M. HERBAUD, M. MOLINIER et B. ZELAQUETT qui ont apporté leur expérience et leur connaissance du Nordeste. Remercions également toute l'équipe de techniciens hydrologues de la SUDENE, dont le professionnalisme et le savoir-faire auront permis les installations et mesures sur le terrain, ainsi que le dépouillement de près de 3500 stations x années d'observations : Beronildo J. de FREITAS, Breno MAIA, Carlos Alberto GALINDO, Francisco das CHAGAS, Francisco ROLIM, Gisnaldo ZELAQUETT, Maria José LINS, Moisés ASSUNÇÃO, Nice CAVALCANTE, Paulo Frassinete ARAUJO, Roberto CARNEIRO LEÃO, Alcides FREITAS, Crenivaldo VELOSO, Edilton M. das MERCES, Edivaldo MENEZES, Henrique RANGEL,IVALDO G. da SILVA, Ivalter V. de SENA, Ivo QUEIROZ, Joabel V. de ANDRADE, João Maria CORTES, Josué G. dos SANTOS, Mário ACIOLI, Mário Lúcio MENDONÇA, Neide FERREIRA, Paulo H. NASCIMENTO, Pedro SALVADOR, Paulo VARELA, Tiago N. VARELA e Vera Lúcia ALVES.

- * Les pédologues de l'ORSTOM ou de l'EMBRAPA, qui ont apporté l'indispensable complément de leur connaissance du comportement des sols face à l'eau. J.C. LEPRUN est à l'origine de ce travail. Flávio H. BARRETO a su ensuite franchir l'espace séparant ces deux disciplines. Le dialogue aura été enrichissant pour les deux parties. La contribution des pédologues est l'une des bases de la méthode de transposition hydrologique que nous avons élaborée.
- * L'équipe jeune et dynamique d'informaticiens et de modélisateurs aura permis de concevoir, gérer et de faire fonctionner des modèles et des systèmes exploitant la Banque de donnée de la SUDENE. Peter PUNGS aura été le premier, suivi par Carlos Henrique ALBUQUERQUE, Roberto DOHERTY, Marc MONGAILLARD, Luciana PEREIRA, Cynthia CARVALHO et Daniela V. de ALMEIDA, qui auront tous su allier compétence, efficacité et bonne humeur.
- * L'équipe du projet de Technologie Appliquée à la Petite Irrigation (TAPI) de la Coopération Française, avec laquelle nous avons construit une fructueuse association alliant chercheurs et aménageurs, qui nous a souvent amené à reformuler et à simplifier nos techniques et la présentation de nos résultats, pour pouvoir répondre aux questions concrètes des utilisateurs: J.L. MILLO et M. LEFEBURE DU BUS auront été les premiers, suivis par R. COURCIER et E. SABOURIN. Enfin F. MOLLE, dont l'esprit curieux et la présence amicale et stimulante auront catalysé, pendant cinq ans, une remise en question permanente de toute sorte de certitudes, riche en surprises et en enseignements. Sans lui, nous ne nous serions pas lancés dans l'entreprise de l'élaboration du "*Manuel du petit açude*"*, qui a été, à son tour, déterminante dans la décision d'élaborer la synthèse hydrologique que nous présentons ici.
- * Maria José B. CAVALCANTI, Maria do Carmo C. DUARTE, Claudine DIEULIN, Brigitte LE ROUGET et Muriel TAPIAU ont assuré la saisie, la traduction et la mise en forme de ce document. Nous avons aussi compté avec le soutien et l'efficacité de Rosana A. SOARES, Célia M. de MOURA et Maria Ivanize de SOUZA.
- * A Montpellier remercions tout d'abord les membres du Jury: M. BOCQUILLON, dont l'attitude, toujours positive et bienveillante a su calmer mes inquiétudes, B. POUYAUD, qui a bien voulu accepter cette surcharge de travail, J. C. LEPRUN et S. CAMPELLO, rapporteurs, ainsi que J.F. NOUVELOT, qui ont tous les trois été acteurs du programme d'études des petits bassins dans le Nordeste.
- * Remercions, enfin, tous mes autres collègues de l'ORSTOM, qui m'ont apporté leur soutien et leur compétence, lors de la mise au point finale à MONTPELLIER: J.P. DEBUICHE, A. DEZETTER, Fabienne MONTGAILLARD, F. DELCLAUX, J.M. FRITSCH, M. SUAVIN, P. CHEVALLIER, P. RIBSTEIN, P. RAOUS, R. CHARTIER, Y. LHOTE, P. HISARD.
- * Et enfin, *last but not least*, tous mes proches qui m'ont appuyé dans ces moments difficiles, Dominique, Roger et mes parents.

* Açude est le nom donné dans le Nordeste aux barrages de toutes tailles.

HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS DU NORDESTE SEMI-ARIDE BRÉSILIEN

RÉSUMÉ

La connaissance et l'utilisation des ressources en eau est d'une importance vitale dans toute la partie semi-aride du Nordeste brésilien, qui couvre plus de 800.000 km². Pour cela, depuis près de trente ans, on a entrepris le suivi et l'analyse du comportement hydrologique de plusieurs dizaines de petits bassins versants représentatifs qui ont été choisis pour représenter les principaux types de bassins.

On constate une grande diversité des régimes hydrologiques, aggravée par une irrégularité climatique extrême.

Une modélisation hydrologique systématique a permis d'identifier deux grandes zones climatiques, Sertão et Transition, à l'intérieur desquelles, chaque 100 mm de pluie supplémentaire provoque un accroissement de 40% des écoulements moyens annuels. Une typologie des bassins a été établie en fonction, principalement, des caractéristiques des sols et de la couverture végétale.

Nous proposons une méthode de transposition des résultats obtenus vers des bassins dépourvus d'information hydrologique. Cette méthode permet une estimation simple des ressources en eau et des débits de pointe des crues en fonction des sols, de la pluviométrie moyenne du bassin et d'autres facteurs correctifs.

Mots clés :

- *Nordeste brésilien*
- *Bassin représentatif/expérimental*
- *Modèle hydrologique*
- *Typologie de bassins*
- *Transposition hydrologique*
- *Écoulement annuel*
- *Crue de projet*

HIDROLOGIA DAS PEQUENAS BACIAS DO NORDESTE BRASILEIRO

RESUMO

O conhecimento e a utilização dos recursos em água é de importância vital em toda a região semi-árida do Nordeste brasileiro, que cobre mais de 800.000 km². Por isto, há cerca de trinta anos, que se vem procedendo ao monitoramento e análise do comportamento hidrológico de várias dezenas de pequenas bacias experimentais, que foram escolhidas para representar os principais tipos de bacias.

Constata-se uma grande diversidade de regimes das diferentes bacias, agravada por uma irregularidade climática extrema.

Uma modelização hidrológica sistemática permitiu identificar duas grandes zonas climáticas, Sertão e Transição, no interior das quais, cada 100 mm de chuva suplementar provoca um aumento de 40% dos escoamentos médios anuais. Uma tipologia das bacias foi estabelecida em função, principalmente, das características dos solos e da cobertura vegetal.

Propomos um método de transposição dos resultados obtidos para as bacias carentes de informação hidrológica. Este método permite uma estimativa simples dos recursos em água e das vazões de pico das cheias em função dos solos, da pluviometria média da bacia e de outros fatores corretivos.

Palavras-chaves :

- *Nordeste brasileiro*
- *Bacia representativa/experimental*
- *Modelo hidrológico*
- *Tipologia de bacias*
- *Transposição hidrológica*
- *Escoamento anual*
- *Cheia de projeto*

HYDROLOGY OF SMALL WATERSHED OF THE BRAZILIAN NORTH-EAST

SUMMARY

A knowledge and utilization of water resources is of vital importance for the semi-arid region of the Brazilian north-east, which include more than 800,000 km². This is why, since more than 30 years ago, it has been carried out the monitoring and analysis of the hydrological behavior of several dozens of small experimental watersheds which were selected to represent several types of watershed.

A great diversity of regimes for several watersheds was confirmed, which became worse with extreme climatic irregularities.

A systematic hydrological simulation allowed to identify two big climatic zones, "Sertao" and "Transition", were, for each 100 mm of supplementary rainfall 40 % of the average annual runoff take place. Watershed typology was established in relation, basically, of soil characteristics and vegetal cover.

It is proposed one method of transposition of obtained results for those watersheds with lack of hydrological information. This method allows a simple estimation of water resources and pick flood discharge as a function of soils, of the average rainfall on the watershed and from others corrective factors.

Key words :

- *Brazilian north-east*
- *Representative / experimental watershed*
- *Hydrological model*
- *Typology of the watersheds*
- *Hydrological transposition*
- *Annual runoff*
- *Project flood*

INTRODUCTION

Les tentatives que nous avons faites, en 1979, pour utiliser les résultats de la première synthèse hydrologique, qui était celle du bassin représentatif du RIACHO DO NAVIO, furent très décevantes. On s'aperçut que, malgré un réseau de plus de 70 appareils, suivis pendant sept ans, accompagné de toutes les mesures de caractéristiques physiques et morphologiques recommandées (carte pédologique, densité de drainage, etc.), on s'aperçut donc, que l'on était incapable de comprendre, d'interpréter les différences de comportement et à fortiori de les extrapoler vers un bassin voisin. La déception fut grande, car cette extrapolation ou transposition constituait la finalité et la principale justification de ce programme.

Nous dûmes alors nous rendre à plusieurs évidences:

- a) Pour pouvoir transposer des résultats hydrologiques, il faut pouvoir disposer d'un **échantillon de bassins suffisamment nombreux** pour couvrir l'éventail des situations possibles.
- b) Chacun de ces bassins doit être représentatif de **situations types**, de la façon la moins équivoque possible. Cela implique le choix de bassins homogènes et souvent plus petits.
- c) Pour que les résultats des différents bassins soient comparables entre eux, il est nécessaire d'observer **des protocoles de mesure et de traitement des données absolument reproductibles, donc très stricts**. Les techniques de modélisation constituent un bon moyen de s'affranchir des aléas climatiques de la période observée.
- d) Il importe que les **protocoles d'évaluation des caractères physiques, biologiques et morphologiques** des bassins versants soient également très rigoureux, pour pouvoir servir de base à cette transposition. L'état de la végétation et des premières couches du sol sont déterminants. **La participation de pédologues s'impose**.

La suite du programme s'efforça de suivre ces principes. L'analyse et la compréhension des mécanismes hydrologiques au niveau du profil pédologique et du versant furent grandement facilités par les conseils de J. C. LEPRUN, qui nous aida à mettre au point, en 1983, une première ébauche de méthode de transposition des lames écoulées annuelles.

En 1990, suite à la collecte d'un grand nombre d'informations nouvelles, **cette méthode fut refondue**. Son utilisation a été simplifiée, elle permet à l'aménageur, non spécialiste en hydrologie, d'obtenir pour des bassins dépourvus d'information hydrologique, une première estimation de la ressource en eau, de sa variabilité et du débit de pointe de la crue de projet. L'intervention d'hydrologues et de pédologues alliés à l'existence d'informations complémentaires pourront être utilisées avec profit pour améliorer la précision de cette première estimation.

Ce mémoire cherche tout d'abord à décrire les études et l'information hydrologique qui ont été recueillies. Il s'efforce ensuite de retracer le cheminement qui nous a conduit à proposer cette méthode de transposition. Ce travail est divisé en cinq chapitres.

Dans le **premier chapitre**, nous décrivons rapidement le contexte physique et climatique du Nordeste brésilien, cadre de l'étude et tentons d'ébaucher un historique des études de petits bassins dans cette région.

Dans le **deuxième chapitre**, nous nous sommes efforcés de cerner les aspects théoriques, la problématique et la spécificité des études hydrologiques sur petits bassins en abordant plus spécialement les problèmes de la planification de ces études. Les techniques d'étude effectivement utilisées dans le Nordeste sont ensuite décrites et replacées dans ce contexte.

Un **troisième chapitre** décrit les bassins représentatifs étudiés et résume les résultats qui y ont été obtenus en indiquant l'apport spécifique de chaque bassin. L'absence de document de référence réunissant l'information obtenue sur tous ces bassins explique l'ampleur de cette partie.

Le **quatrième chapitre** montre et justifie les différentes étapes de l'élaboration de la méthode de transposition des écoulements annuels.

- Une typologie des petits bassins est d'abord proposée, en fonction des caractéristiques des régimes hydrologiques. Cette typologie s'appuie, d'une part sur une modélisation systématique des relations pluie-débit, d'autre part sur un zonage climatique général du Nordeste.
- L'analyse du rôle et de l'influence des différents facteurs conditionnels des régimes (sols, relief, végétation, etc.), alliée à l'utilisation de l'information en provenance du réseau général hydropluviométrique, a permis d'établir ensuite les bases de la méthode de transposition recherchée.
- Cette méthode est enfin adaptée aux conditions spécifiques des petits bassins et, bien sûr, validée.

Un **cinquième chapitre** présente, finalement, les différentes étapes de l'élaboration d'une formule de calcul du débit de pointe de la crue de projet. La simplicité de la formule s'explique par trois raisons:

- L'uniformité relative des caractéristiques des fortes averses dans l'ensemble du Nordeste.
- La faible occurrence, dans les régions étudiées, de zones de très faible relief, qui rendraient nécessaire l'utilisation d'autres formules.
- La petite taille de l'échantillon de bassins, qui nous a obligé à nous limiter à une formule qui représente l'enveloppe supérieure des débits qu'il faut craindre.

PREMIERE PARTIE

1. CONTEXTE NATUREL ET HISTOIRE DE L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS

1.1 CONTEXTE NATUREL DU NORDESTE DU BRESIL

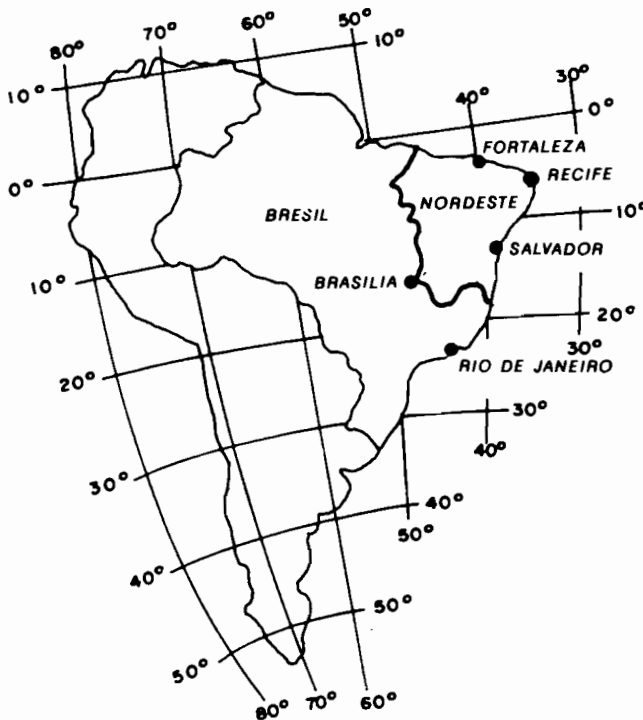


Fig. 1.1. Carte de situation du Nordeste brésilien

Sur le plan administratif, la région Nordeste comprend entièrement les neuf Etats suivants de la fédération brésilienne : Maranhao, Ceará, Piaui, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe et Bahia ainsi que le Nord de l'Etat de Minas Gerais. Elle occupe une surface de 1 600 000 km², soit 20 % du territoire brésilien. Le plus grand, l'Etat de Bahia, avec ses 561 000 km², est plus grand que la France. Le plus petit, l'Etat de Sergipe couvre seulement 21 994 km².

Un anticyclone quasi permanent stationne sur la partie centrale du Nordeste, repousse l'équateur thermique vers le Nord et provoque, en fin de compte, une faiblesse et surtout une grande irrégularité des précipitations, anormales pour ces latitudes. Le "Polygone des Sécheresses" occupe près d'un million de km², soit la plus grande partie du Nordeste, à l'exception des bandes littorales et continentales occidentales plus humides.

Le Nordeste du Brésil est l'une des régions les plus anciennement peuplées de ce pays, qui possède une grande richesse culturelle héritée de la colonisation. Plus de quarante cinq millions d'habitants peuplent actuellement le Nordeste (IBGE, 1991). Vingt millions d'entre eux vivent dans le *polygone des sécheresses*. Il s'agit en majorité de petits propriétaires et de paysans sans terre.

LE SERTÃO DU NORDESTE BRÉSILIEN

Une zone semi-aride, peu peuplée,
tournée vers l'élevage

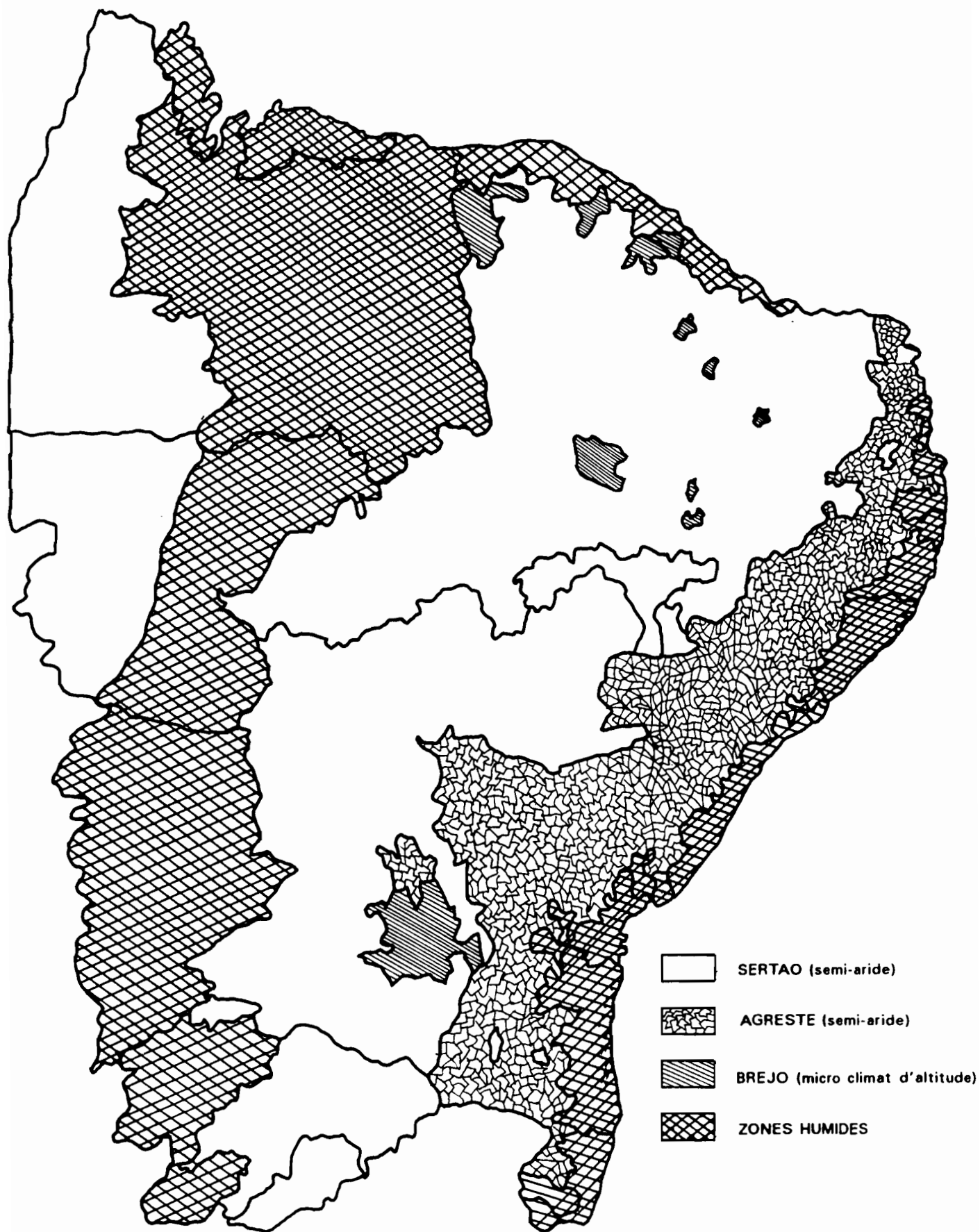


L'eau peut être stockée

Mais il faut la gérer et l'utiliser.



Figure 1.2 Grandes zones physiographiques du Nordeste



Les grandes zones géographiques

Le Nordeste peut être divisé en trois grandes zones physiographiques et climatiques, bien différentes.

La zone côtière étroite et humide ou "*Zona da Mata*", où se trouvent les grands centres urbains, s'étend du nord de l'Etat du Rio Grande do Norte au sud de l'Etat de Bahia. Elle était autrefois recouverte de grande forêt équatoriale humide, aujourd'hui remplacée par la monoculture de la canne à sucre ou du cacao et par des formations végétales secondaires telles que des savanes arborées et taillis de jachère. La formation géologique principale est constituée de grés et d'argiles gréseuses d'origine continentale appelée "*Barreira*" semblable, selon LEPRUN (1983), au Continental terminal africain. Les sols dominants sont les "latosols" et les "podzoliques jaune-rouge". Le climat est tropical chaud et humide d'alizé. La pluviométrie annuelle y varie de 1200 à plus de 2500 mm. La saison des pluies s'étend de novembre à mai. L'humidité relative dépasse 85 % toute l'année.

La zone de "*l'Agreste*" borde la zone de "*la Mata*" à l'ouest. C'est une zone intermédiaire entre la zone humide précédente et le Sertão, plus sec. On y cultive des fruits et des légumes ; l'élevage des bovins y est très important. On passe des forêts du littoral à des formations herbeuses et arbustives. Le sédimentaire continental précédent s'amincit vers l'ouest, disparaît et laisse alors affleurer les roches cristallines du socle précambrien. Les sols, de type "podzoliques", moyennement épais sur le sédimentaire, passent à des sols peu épais, riches en minéraux sur le socle cristallin.

La troisième zone est le "*Sertão*" proprement dit. La végétation originelle, la "*caatinga*", est composée d'espèces xérophiles et épineuses à strate herbacée graminée rare ou absente. Le relief peu ondulé est constitué d'inselberg et de rares plaines intérieures sur le socle précambrien, forme de grands plateaux ou "*chapadas*" sur les formations sédimentaires. Les sols du Sertão sont des sols bruns non calciques, des vertisols, des planosols, des lithosols, des régosols et des sols podzoliques. Sur les formations sédimentaires se développent des cambisols et des latosols.

Le climat semi-aride est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle qui varie de 400 à 800 mm. L'élevage des bovins est l'activité dominante du Sertão. Seulement 5 % de la terre est cultivée pour la subsistance.

Nous ne mentionnerons que pour mémoire la zone préamazonique humide appelée "*meio-norte*", qui est située à l'ouest du Sertão et donc de notre zone d'étude.

La figure 1.2. montre les types de d'occupation du sol caractéristiques de chacune des grandes zones géographiques.

Nous présenterons de manière plus détaillée les mécanismes du climat, le régime des précipitations, les sols et la végétation qui sont, nous le verrons, les facteurs explicatifs principaux des régimes hydrologiques des zones sèches.

1.1.1 Les mécanismes du climat : Pourquoi y a-t-il une zone sèche ?

"La moyenne des précipitations dans le Nordeste et sa variabilité interannuelle constitue l'un des plus grands défis non résolus de la météorologie tropicale" (MOURA et SHUKLA 1981).

On pourrait s'attendre à retrouver dans le Nordeste l'abondance des précipitations habituelle des régions équatoriales. Il n'en est rien. On constate, au contraire, une faiblesse et une irrégularité des précipitations anormales pour ces latitudes, sur une surface de près d'un million de km², dans laquelle les totaux moyens annuels sont inférieurs à 800 mm, pouvant parfois s'abaisser en-dessous de 400 mm.

L'irrégularité des précipitations est très forte. Les coefficients de variation des totaux annuels sont toujours supérieurs à 0,25 dépassant parfois 0,40. Sur le bassin expérimental de SUME, le total de 1983 n'a été que de 248 mm, alors que celui de 1985 a atteint 1438 mm !

Les maximums principaux des précipitations surviennent à des dates différentes dans les diverses parties du Nordeste :

- . De février à avril, dans la partie Nord du "Sertão"
- . En décembre, dans la partie Sud du "Sertão"
- . En avril-juin, dans la "Zona de Mata" et dans l'"Agreste"

Pourquoi ces faibles précipitations et cette irrégularité dans le Sertão ? Le problème est complexe. Plusieurs auteurs se sont penchés sur ses divers aspects.

Déplacement des zones frontales qui engendrent les précipitations

Les schémas de la figure 1.3 et 1.4 montrent, à l'échelle du continent Sud Américain, les positions des principaux fronts responsables des précipitations.

On voit, sur ces figures, que la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) (appelée parfois Front Intertropical (FIT)), qui correspond aussi à ce que certains auteurs ont appelé équateur thermique, est décalée vers le Nord. Le déplacement des deux zones de convergence de la figure 1.3 est lié à l'anticyclone semi fixe de l'Atlantique Sud. Cette figure 1.3 montre bien l'origine différente des pluies qui surviennent, à des dates différentes, dans la partie Nord et Sud du Sertão et proviennent donc, soit de la ZCIT, soit d'un front froid issu de la zone de convergence frontale de l'Atlantique Sud.

La figure 1.4 montre comment un front froid peut atteindre la latitude anormalement faible de 10° S.

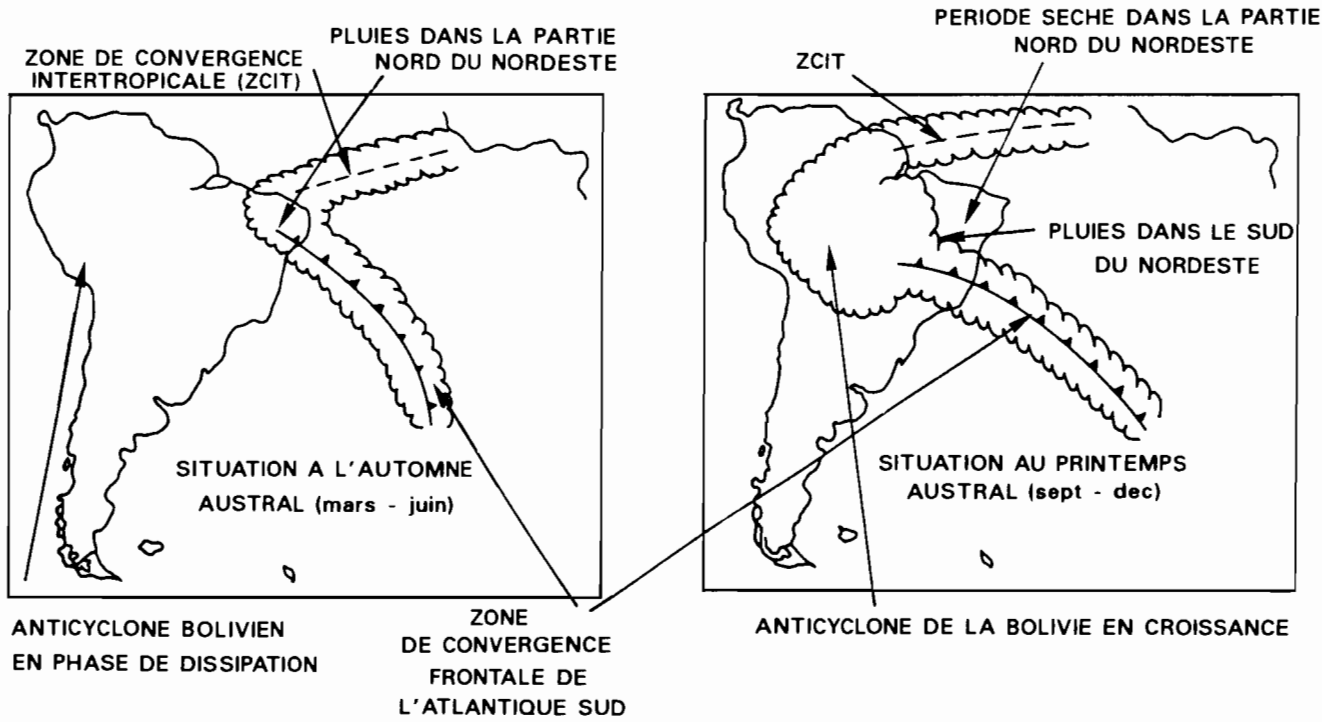


Figure 1.3 : Schéma d'interaction de la ZCIT avec les autres zones de convergence.

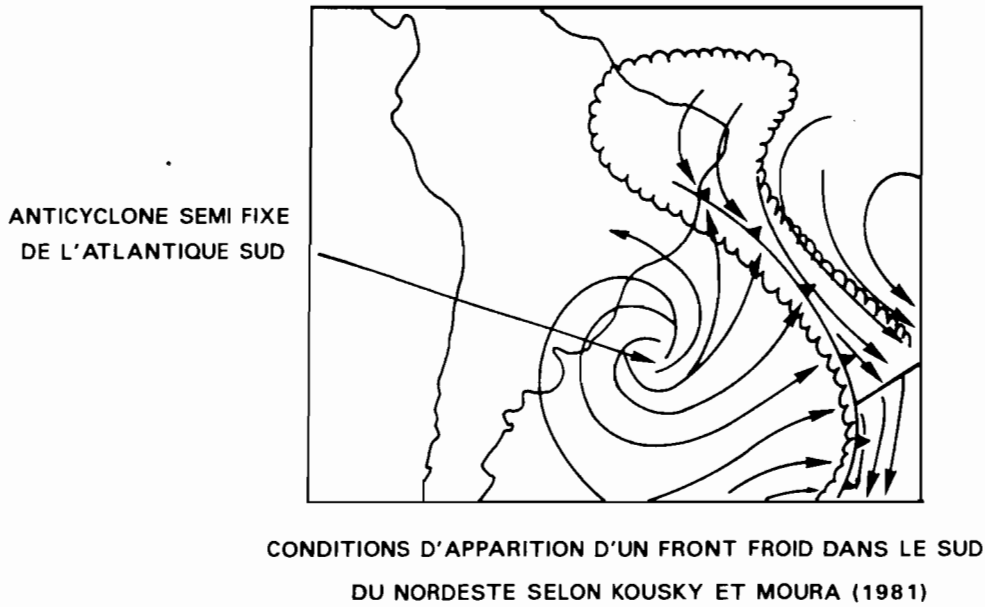


Figure 1.4 : Conditions d'apparition d'un front froid dans le Sud du Nordeste, selon KOUSKY et MOURA (1981)

Les quatre principaux systèmes de perturbations

NIMER (1973) a identifié quatre systèmes principaux de perturbations. En schématisant, on pourrait dire que les zones les plus sèches, situées au centre du Nordeste, sont les plus difficilement atteintes par ces perturbations, à cause de leur éloignement ou à cause d'un effet écran provoqué par le relief. L'effet de l'orographie et la proximité de la mer viennent, évidemment, se superposer localement aux quatre systèmes décrits.

Ces perturbations peuvent provenir de quatre directions différentes, qui correspondent à peu près aux quatre points cardinaux.

- **Le système des perturbations du nord** provoquées par le déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), qui se trouve à une latitude moyenne de 5° N. Ses effets se font surtout sentir entre janvier et mai avec un maximum en mars-avril. Ce système de perturbations est le principal responsable des précipitations dans toute la moitié nord du polygone des sécheresses où l'on observe un maximum annuel unique des précipitations entre mars et avril.
- **Le système de perturbations en provenance de l'ouest**, dont l'origine paraît liée au mouvement ondulatoire qui apparaît lorsque le front polaire atlantique entre en contact avec les masses d'air chaud de la zone tropicale. Ces perturbations surviennent, surtout entre septembre et avril et provoquent des orages et des pluies du type mousson dans la moitié sud du polygone des sécheresses.
- **Le système de perturbations en provenance de l'est**, c'est à dire de l'océan Atlantique, ne dépasse guère la "Zona da Mata". Ces précipitations surviennent pendant l'automne et l'hiver austral, c'est à dire entre les mois de mars et d'août.
- **Le système des perturbations du sud**, dues à des invasions d'air polaire, provoque des pluies frontales. Ces perturbations n'atteignent le Nordeste que dans sa partie sud et en juillet-août, en ne dépassant que rarement le parallèle 15° S. La zone centrale du Sertão n'est jamais atteinte par ces perturbations.

Quelques théories et explications

Les raisons profondes de l'existence d'une zone sèche dans cette région ne semblent pas clairement élucidées. Est-ce dû, comme l'ont supposé CHARNEY (1975) et GOMES FILHO (1979), à un effet d'auto-maintenance de zone aride, dû à un albédo élevé ? Ou bien, au fait que cette région soit proche de la convergence des alizés ? Ou encore parce qu'elle est soumise, de par sa position, à l'influence d'une sorte de prolongation continentale de l'anticyclone semi-permanent de l'Atlantique Sud ? Ou bien, tout simplement, parce que les zones frontales, que nous venons de décrire, n'atteignent que rarement cette partie du continent sud-américain. Les hypothèses et théories sont nombreuses, mais les certitudes sont rares.

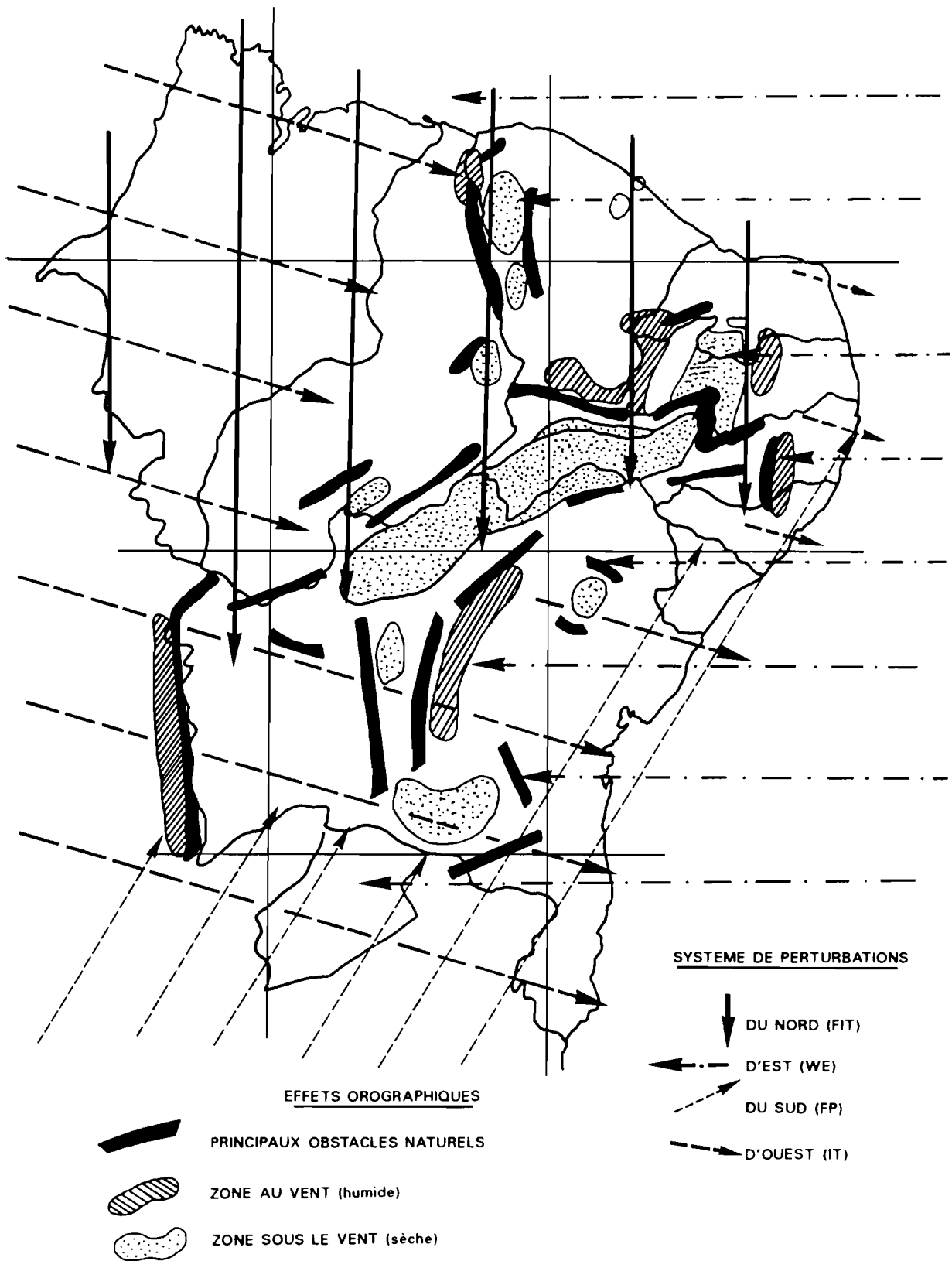


Figure 1.5 : Les systèmes de circulation atmosphériques et les principaux effets orographiques.

Récemment MECHOSO *et al* (1990), d'une part et HASTENRATH (1990) d'autre part, ont respectivement étudié le rôle joué par les anomalies thermiques de l'océan sur la variabilité des pluies dans le Nordeste du Brésil et les possibilités ainsi offertes de pouvoir prévoir plusieurs mois à l'avance la qualité de la saison des pluies à venir. Ce sujet avait été abordé dès 1977 par HASTENRATH et HELLER (1977) et par MARKHAM et McLAIN (1977) puis par MOURA et SHUKLA (1981), qui avaient remarqué qu'en situation de pluie déficitaire les anomalies thermiques à la surface de l'océan Atlantique étaient globalement négatives au sud de l'Equateur et positives au nord ("dipole" thermique). Cette hypothèse a été testée sur la période 1964-1979 par SERVAIN (1985) et SERVAIN *et al* (1990). Parallèlement, on a mené une enquête approfondie sur les conditions de la circulation atmosphérique générale responsable des précipitations sur le Nordeste du Brésil en différenciant une région Nord plus sensible au mouvement de migration Nord-Sud de la Zone de Convergence Intertropicale d'une région sud plus assujettie aux facteurs pluviogéniques des systèmes frontaux sur l'Atlantique Sud (CHU, 1983 ; KOUSKY, 1985).

D'autres études, depuis CAVIEDES (1973), tentent de situer la variabilité interannuelle des pluies du Nordeste brésilien, en fonction du phénomène El Nino et plus précisément de l'El Nino - oscillation australe (en anglais ENSO pour El Nino - Southern Oscillation). Cette corrélation plus ou moins directe a été confirmée statistiquement par ROPELEWSKI et HALPERT (1989). A la suite des situations thermiques et pluviométriques très contrastées des années 1983 et 1984, HISARD (1990) a considéré dans quelle mesure les grands El Nino historiques, documentés par MOLINIER et CADIER (1984-1985) avaient effectivement été associés avec une situation de sécheresse accentuée sur le Nordeste du Brésil comme en 1983. L'anomalie pluviométrique semble s'étendre à l'ensemble du bassin équatorial jusqu'aux côtes de l'Angola et du Congo, soulignant à nouveau le caractère planétaire (cellule de circulation de WALKER, Oscillation Australe) des facteurs qui conditionnent la pluviométrie du Nordeste du Brésil.

1.1.2 Les précipitations

■ Les totaux annuels

Les isohyètes de la carte 1.6, bien que très réduites, illustrent la répartition des pluies annuelles moyennes dans le Nordeste.

L'isohyète de 800 mm délimite une surface de 950.000 km², qui correspond *au polygone de la sécheresse* et couvre 60 % de la région Nordeste.

Cette isohyète de 800 mm délimite également la région que nous nous proposons d'étudier.

2 %, seulement, du polygone des sécheresses reçoit une pluviométrie inférieure à 400 mm. Il s'agit de régions où la faiblesse des précipitations est aggravée par des effets d'écran liés au relief. 25 % de ce polygone reçoit une pluviométrie inférieure à 600 mm.

On remarque, à l'intérieur du polygone, plusieurs zones dont la pluviométrie dépasse 800 mm. Il s'agit en général d'un type de micro-climat d'altitude appelé "*Brejo*". Les précipitations y sont plus abondantes, les températures plus faibles, l'humidité plus forte et les brouillards et nuages plus fréquents. Le climat des *brejos* ne peut plus être qualifié de semi-aride. Ils jouent un grand rôle dans l'économie régionale et aussi celui de château d'eau pour les cours d'eau.

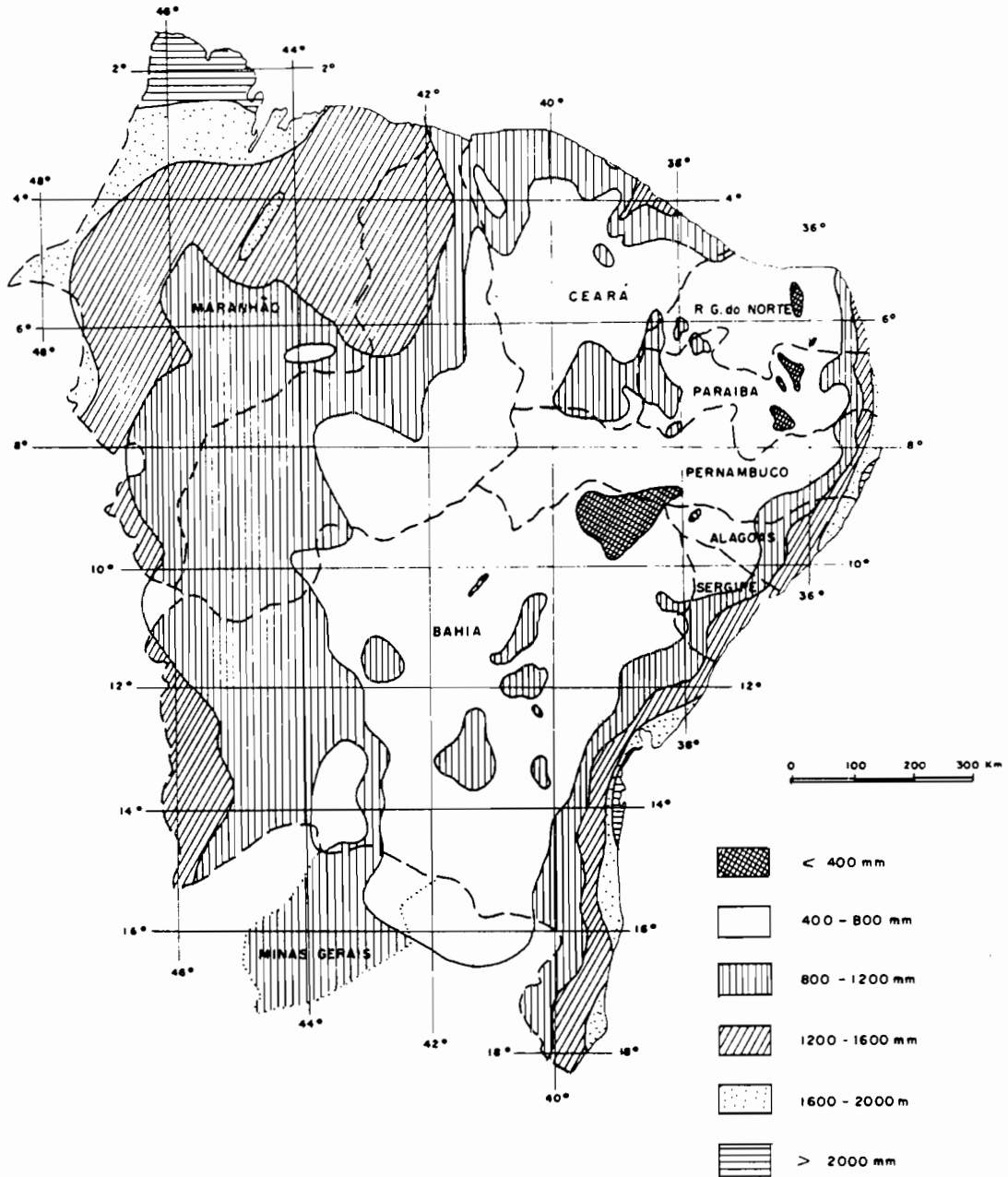


Figure 1.6 : Précipitation annuelle moyenne

■ **Distribution saisonnière des précipitations, journalière et des intensités.**

La figure 1.7 indique les dates des périodes les plus pluvieuses dans les principales parties du Nordeste. La distribution mensuelle des précipitations est très variable. Cette même figure 1.7 montre la distribution des totaux mensuels de cinq pluviomètres :

- FORTALEZA, qui n'est pas situé dans la zone semi-aride, est le plus ancien pluviomètre du Nordeste. Il sert très souvent de référence.

- La saison sèche, bien marquée, des pluviomètres de IBICUA et de PETROLINA est caractéristique de la partie Nord du Sertão.
- Il n'existe, au contraire, aucun mois vraiment sec pour le pluviomètre de QUEIMADAS, situé dans le Sertão Sud ou pour celui de Garanhuns situé dans l'agreste.

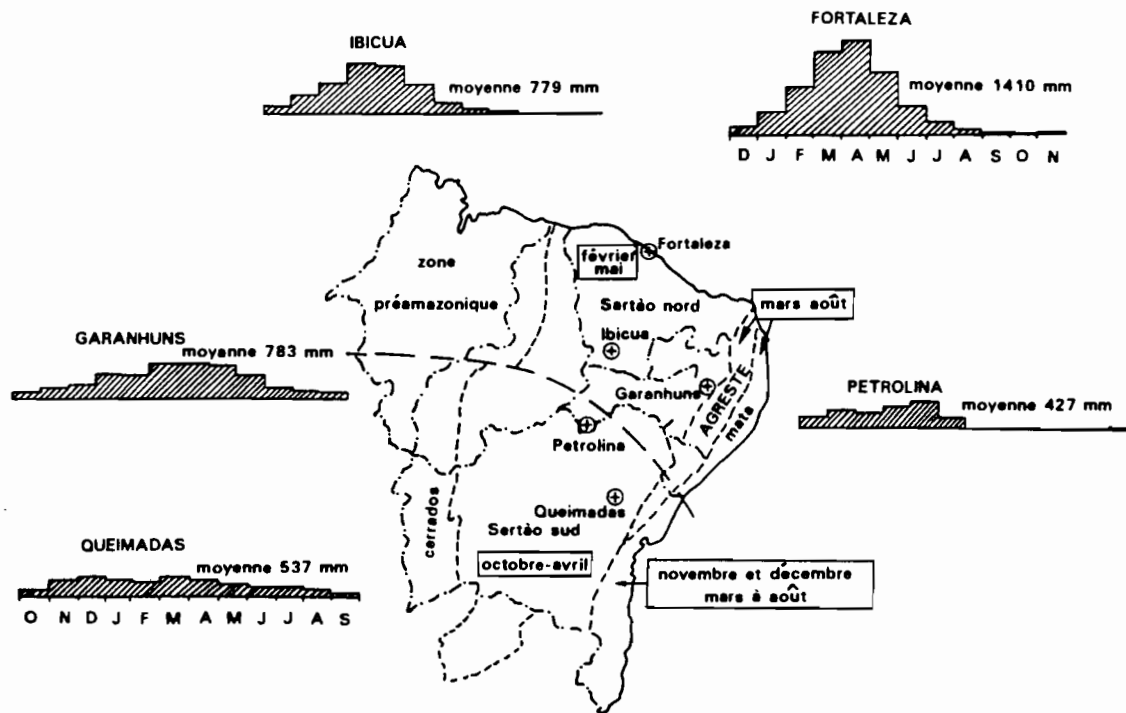


Figure 1.7 : Quelques distributions mensuelles des précipitations du Nordeste brésilien

■ Précipitations journalières et intensités de pluies

CADIER *et al* (1981) ont déterminé pour l'Etat du Pernambouc les valeurs des précipitations en 24 h correspondant à des fréquences caractéristiques. Les meilleurs ajustements statistiques aux échantillons de pluies journalières sont obtenus avec la loi de GOODRICH.

ZONE PHYSIOGRAPHIQUE	PERIODE DE RETOUR		
	1 an	10 ans	100 ans
ZONA DE MATA	77 mm	129 mm	181 mm
AGRESTE ou ZONE DE TRANSITION	52 mm	96 mm	146 mm
SERTAO	61 mm	107 mm	158 mm

Les courbes "intensités durées" de la figure 1.8. permettent de déterminer les *totaux de pluie* en fonction de leur période de retour pour diverses durées.

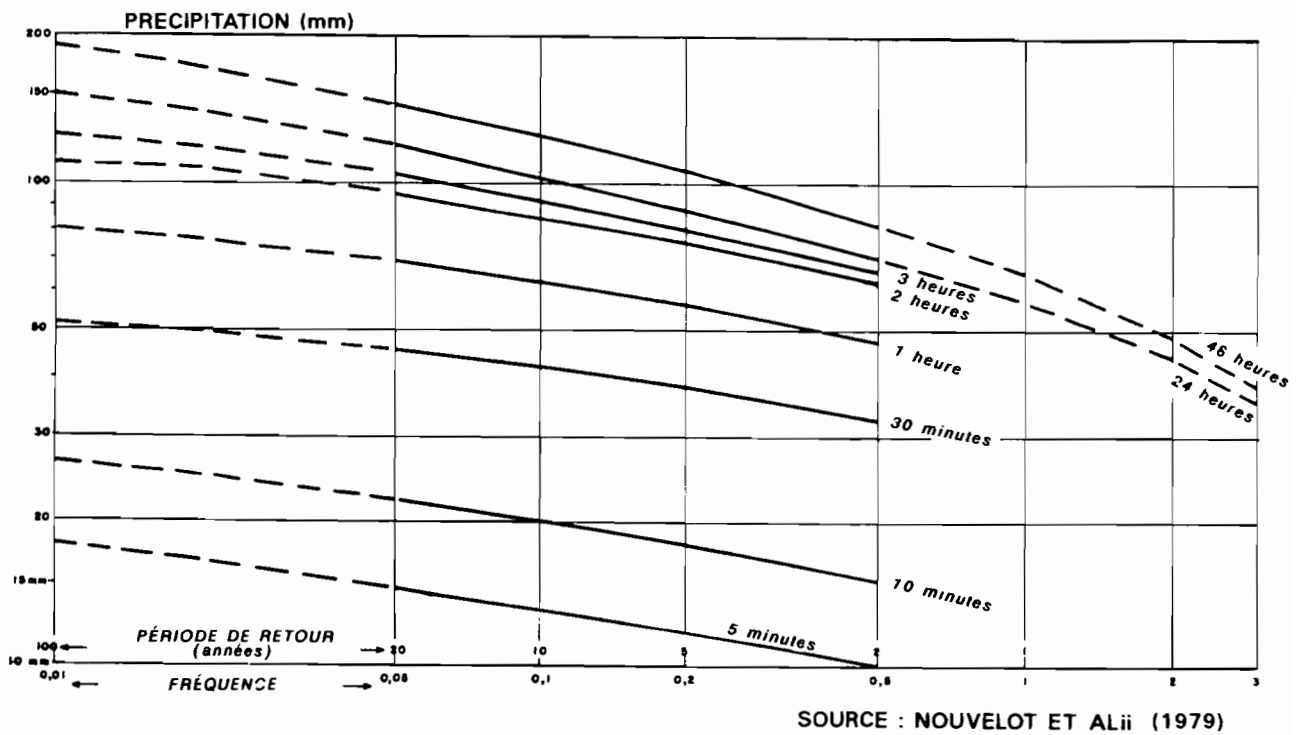


Figure 1.8. : Précipitation maximale en fonction de sa durée et de sa période de retour.

1.1.3 Les sécheresses

Selon MOLINIER et CADIER (1984), la première référence historique à une sécheresse remonte à celle relatée par la compagnie de Jésus dans la Bahia en 1559. Ce fléau continua à s'abattre avec une trop grande régularité sur le Nordeste au cours des siècles suivants en ayant des conséquences humaines aggravées par l'accroissement de la population. La grande sécheresse de 1877 - 1878 reste marquée dans les mémoires. Survenant après une période de 32 années normales, dont l'abondance relative avait favorisé l'accroissement de la population, cette sécheresse fut la plus sévère par le nombre de morts, dont on estime le nombre à 500.000.

En 1888, 1889 et 1898, le Sertao fut de nouveau durement éprouvé.

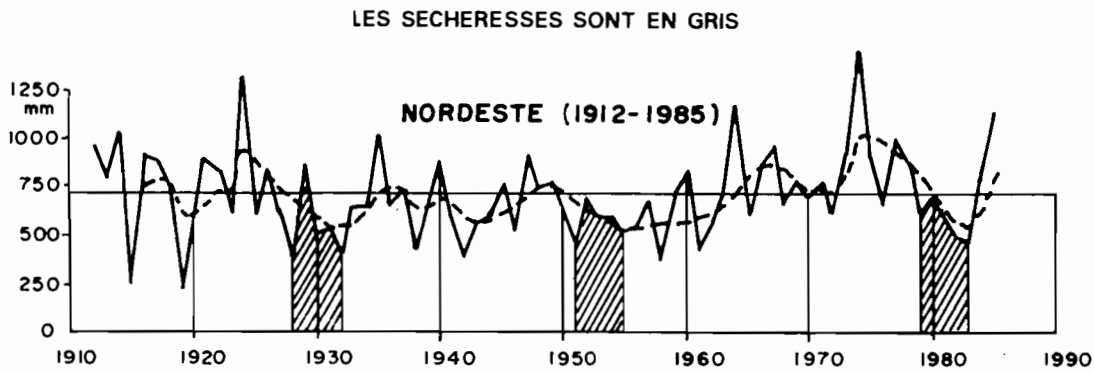


Figure 1.9 : Chronique des indices pluviométriques pour l'ensemble du Nordeste. Selon MOLINIER et CADIER.

La chronique des précipitations, pour l'ensemble du Nordeste, tracée sur la figure 1.9, permet de situer les principales sécheresses des 80 dernières années. On y remarque les périodes les plus désastreuses de ce siècle.

1930 à 1932, 1952 et 1953 et 1979-83 sont des périodes sèches de plusieurs années consécutives, qui sont les plus dramatiques sur le plan humain, puisqu'elles épuisent la capacité de résistance des habitants, provoquant famine, exode, mort et banditisme.

1915, 1919, 1942 et surtout 1958 furent des années de sécheresse qui, bien qu'isolées, eurent des conséquences humaines et sociales très graves.

Les sécheresses correspondent en général à un très grand déficit pluviométrique. La végétation naturelle ne verdit pas, reste couleur de cendre et les rivières restent sèches. Mais il y a aussi ce que l'on appelle la "sécheresse verte" qui correspond à une année dont les pluies sont mal réparties et ne permettent pas l'accomplissement des cycles végétatifs des cultures pluviales, mais suffisent à faire reverdir la végétation native xérophile. Si les pluies sont concentrées en peu de temps, on peut observer, comme ce fut le cas en 1981, des écoulements et des crues considérables.

Les plus graves sont, sans aucun doute, les sécheresses s'étalant sur plusieurs années au cours desquelles les petits açudes et les petites nappes phréatiques s'assèchent, le bétail meurt et les populations doivent s'exiler pour s'installer dans la périphérie des grands centres urbains.

Une finalité pratique principale des études hydrologiques des petits bassins de cette région sera bien sûr, de mieux connaître les ressources pour pouvoir mieux les gérer, les utiliser ou les stocker à bon escient, pour atténuer les conséquences de ces sécheresses.

1.1.4 Les sols de la zone semi-aride

Nous avons repris, avec l'autorisation de son auteur, l'excellente et synthétique description des sols du Nordeste effectuée par LEPRUN (1984-85) :

"Les sols développés sur les roches du socle cristallin sont le plus souvent peu épais, de l'ordre d'un demi à un mètre, partiellement montmorillonitiques, chimiquement riches, mais à caractéristiques physiques souvent défavorables. Il s'agit des sols "bruns non calciques" en tous points semblables aux sols bruns eutrophes tropicaux de l'Afrique sèche, des vertisols, des "planosols" souvent solodisés, des solonetz solodisés, des sols "litholiques" équivalents des lithosols et sols peu évolués, des "régosolos" et "brunizems" peu étendus et des sols "podzoliques" rouge-jaune eutrophes ou dystrophes plus épais, kaoliniques, rappelant d'assez loin les sols ferrugineux peu lessivés argileux africains. Sur les formations sédimentaires se développent des rendzines ou des "cambisols" lorsque la roche est calcaire, divers "latossolos" profonds, acides et très pauvres lorsque la roche gréseuse est constituée par les épaisses couvertures sablo-argileuses d'origine indéterminée des "chapadas" ou par les formations alluvio-colluviales."

En ce qui concerne le comportement hydrodynamique de ces différents sols, nous retiendrons que :

- Sols des formations sédimentaires :

les formations sédimentaires sont en général couvertes de sols épais et perméables comme des latosols, des cambisols ou un peu moins perméables comme les rendzines.

- Sols des formations cristallines :

les formations cristallines engendrent généralement des sols moins épais et peu perméables comme les sols bruns non calciques et les sols lithosoliques. On rencontre généralement, en descendant le long d'un versant les séquences de sols suivantes:

- . Des sols lithosoliques, affleurements de roche et sols podzoliques, qui sont fréquemment situés sur les versants ou sur les parties hautes des toposéquences.
- . Des sols podzoliques et surtout les régosols, qui sont plus perméables.
- . Viennent, enfin, les planosols et les solonetz, qui présentent toujours des problèmes de salinisation et sont situés, tout comme les vertisols, dans la partie inférieure de la toposéquence. Les solonetz sont pratiquement imperméables.

La coupe caractéristique schématique de la figure 1.10 permet de mieux comprendre les positions relatives des différents types de sols.

Nous montrerons plus loin que les caractéristiques hydrodynamiques de l'association sol et végétation constituent un facteur déterminant pour l'explication des régimes hydrologiques de cette région semi-aride.

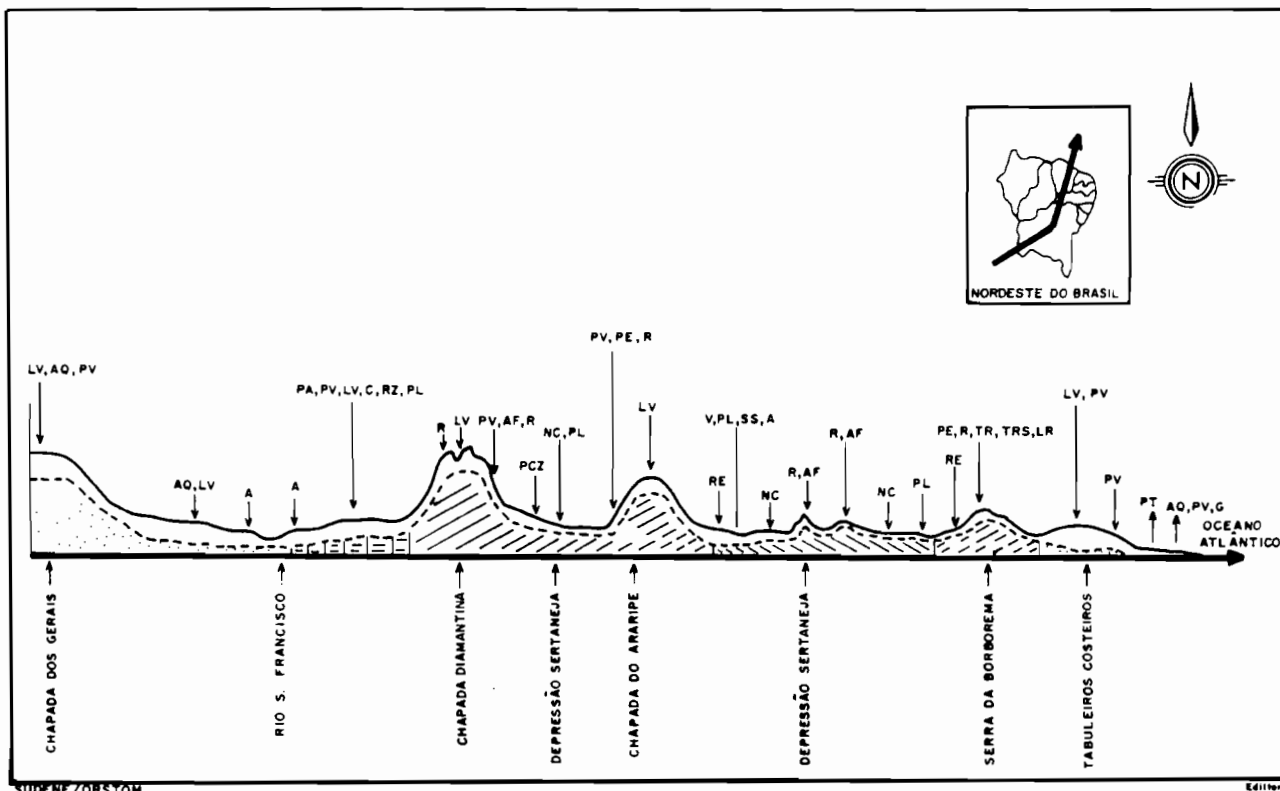


Figure 1.10 : Situation de différents sols par rapport au relief le long d'une coupe caractéristique du Nordeste , (selon F. BARRETO, inédit 1991).

Nous avons reproduit enfin la carte des risques d'érosion proposée par LEPRUN (1983).

Cette carte synthétique a été élaborée par superposition des cartes de susceptibilité des sols à l'érosion avec les facteurs d'érosivité des pluies calculées par la méthode préconisée par WISCHMEIR et SMITH (1978).

Outre l'identification des zones en fonction des risques d'érosion, cette carte, malgré le manque de détail dû à sa petite échelle, permet de pressentir l'enchevêtrement ou le "patchwork" que constituent les sols du Nordeste.

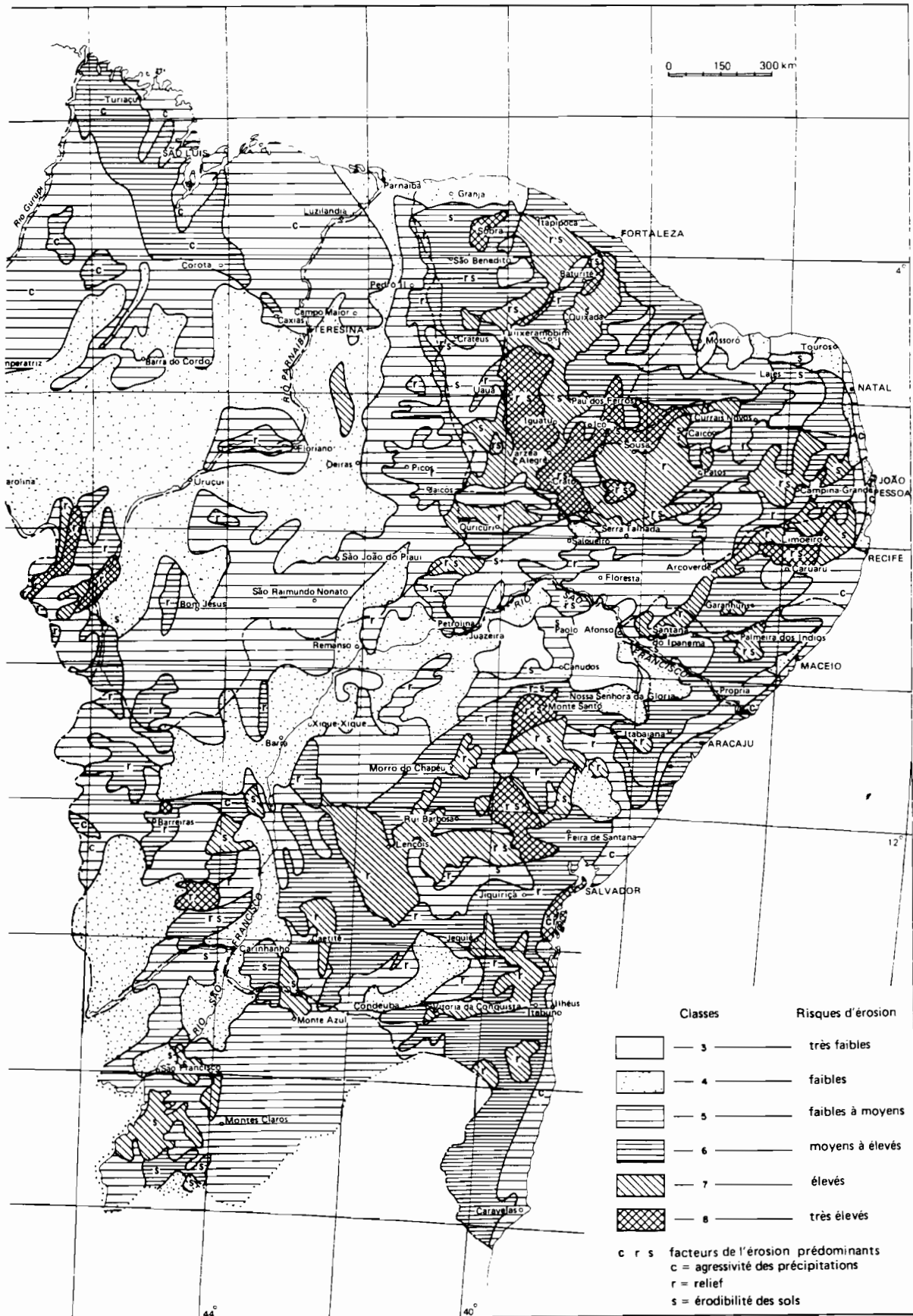


Figure 1.11 : Carte des risques d'érosion du Nordeste brésilien (selon LEPRUN, 1983).

1.1.5 Les açudes, moyen de lutte contre l'irrégularité des écoulements

L'irrégularité des régimes hydrologiques est, bien entendu, encore plus accentuée que celle des précipitations. La figure 1.12 montre la variabilité extrême des écoulements annuels d'un petit bassin de la région de TAUA. Sur les dix ans présentés, cinq n'ont pas dépassé 20% de la moyenne annuelle! Chaque année, la plus grande partie de ces écoulements survient en quelques jours, provoquant parfois des inondations. Puis la rivière s'assèche de nouveau.

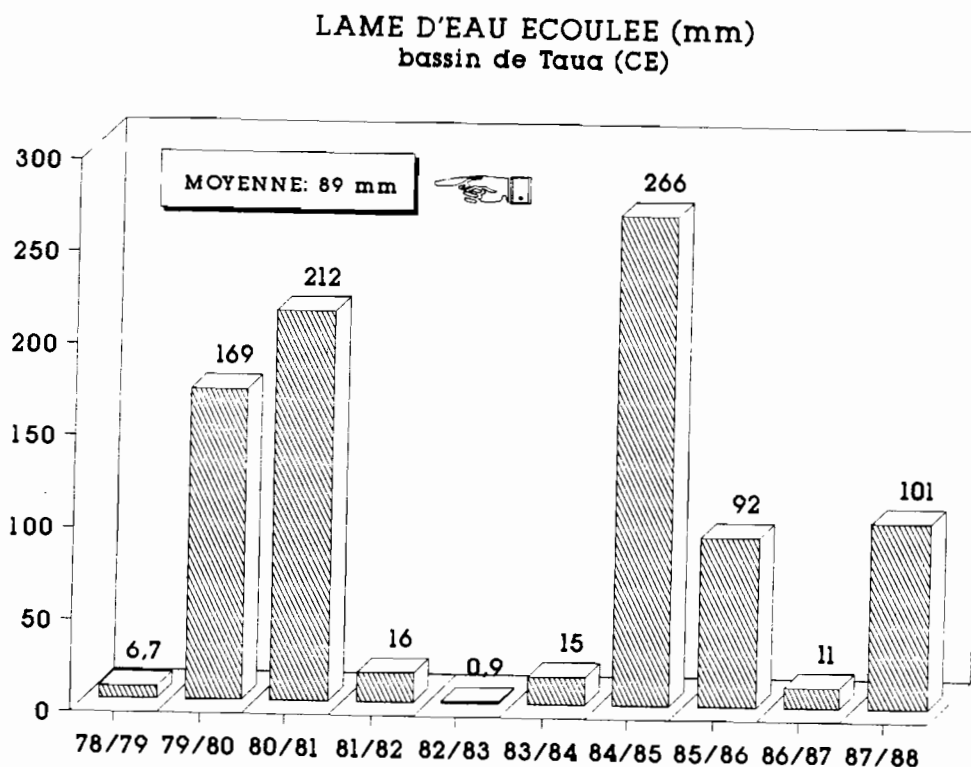


Figure 1.12 Irrégularité des écoulements sur un petit bassin

Pour tenter de conserver un peu du précieux et fugace liquide, les habitants ont, chaque fois qu'ils l'ont pu, construit des "Açudes".

Açude, est le nom qui est donné dans le Nordeste du Brésil, aux barrages de toute taille. C'est l'aménagement hydraulique le plus répandu. On estime leur nombre total à plus de soixante-dix mille. Ce sont en général des petites retenues collinaires en terre qui émaillent le paysage et qui sont le plus souvent dimensionnées et construites de manière très empirique. Leur potentiel est mal utilisé. La principale finalité pratique des études hydrologiques de petits bassins de ces zones sèches a été de fournir les données de base nécessaires au dimensionnement et à la gestion de ces petits barrages. Un Manuel du Petit Açude ("*Manual Do Pequeno Açude*") a ainsi été élaboré pour rendre nos résultats utilisables par les habitants du Sertão (F. MOLLE et E. CADIER, 1991).

Une excellente étude, présentée par François MOLLE (1991c), est consacrée à ce sujet, complémentaire au présent travail.

La figure 1.13 montre l'incroyable densité que peuvent atteindre les açudes. Dans certains bassins, le volume total des barrages est de l'ordre du module de l'écoulement et les densités approchent un açude par km²

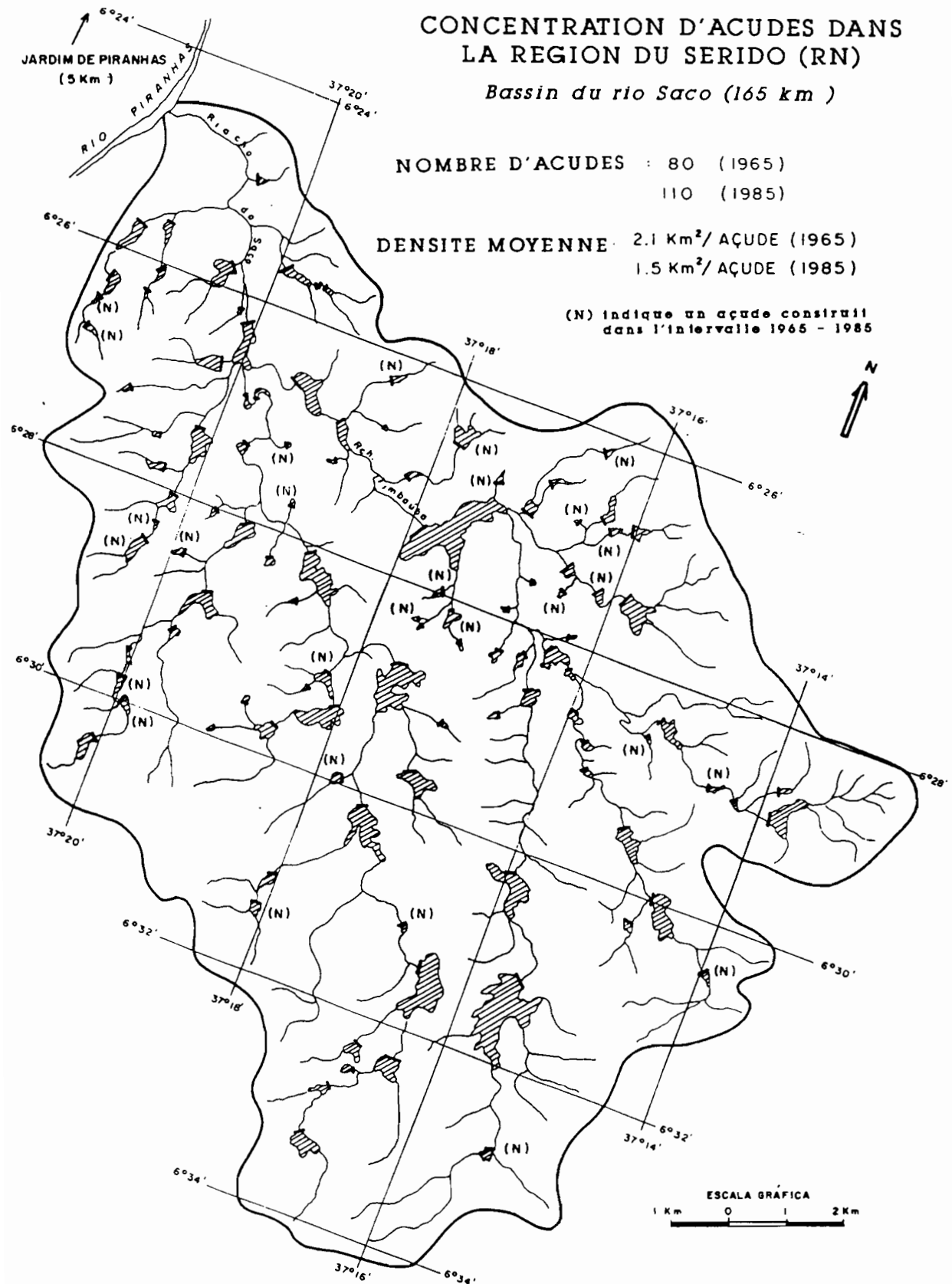


Figure 1.11 : Densité d'açudes dans la région de CAICO (Selon MOLLE 1991c)

1.2 HISTOIRE DE L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS DU NORDESTE

Les repères historiques que nous avons réunis tentent d'expliquer et de retracer la démarche adoptée pour planifier et optimiser la recherche hydrologique sur petits bassins à l'échelle d'une partie d'un continent. De par sa dimension et sa condition, ce programme est unique. La nature des résultats que nous présenterons seront largement conditionnés par la façon dont les études se sont déroulées, ce qui explique l'ampleur et le détail de cette partie historique, qui est en grande partie inédite.

1.2.1 Données antérieures à 1963 : le réseau hydropluviométrique général

■ Méconnaissance de l'hydrologie du semi-aride

Les ressources en eau des zones semi-arides du Nordeste ont longtemps été très mal connues. Les exemples en sont nombreux:

MOLLE (1991b), fait état, par exemple, d'une carte de l'IOCS datant de 1910 attribuant une pluviométrie annuelle de 200 mm à la ville de CARUARU alors qu'elle est, en fait, de l'ordre de 500 mm.

Le premier açude important construit dans le Nordeste, en 1906, l'açude Cedro, est situé tout près du Bassin Représentatif de JUATAMA. Son volume de 128 millions de m³ correspond à une lame écoulée de 600 mm, soit 75 % du volume précipité. De nos jours, on recommanderait, pour ce même site, un volume dix à vingt fois moins important !

La presse écrite et télévisuelle a rapporté des périodes de deux, trois, voire cinq ans sans une goutte de pluie dans ses articles et reportages relatifs à la dernière sécheresse de 1979-83, ce qui est évidemment faux et n'est en tout cas jamais arrivé depuis que l'on observe sérieusement les précipitations.

■ Le réseau de mesure hydrométéorologique de base :

Le réseau général de mesures hydrométéorologiques constitue l'unique source d'information pour cette période.

Selon MAKSOUD (1961), la série pluviométrique continue la plus ancienne connue dans le Nordeste est celle de FORTALEZA, depuis 1848.

Historiquement le réseau de mesure hydrométéorologique du Nordeste s'est mis en place entre 1910 et 1963 en trois grandes vagues bien distinctes décrites par GUSMÃO *et al*, (1979) et JACCON et SECHET, (1980) :

- * C'est à partir de la décennie de 1910, sous l'impulsion de l'IFOCs, que l'installation et les premières mesures systématiques et continues sur un ensemble de 300 à 500 pluviomètres et stations hydrométriques ont démarré dans le Nordeste pour constituer ce que nous appellerions maintenant un réseau de mesures hydrométéorologiques.

- * Au milieu des **années trente**, à la suite de la sécheresse désastreuse de 1930-32, le réseau était de nouveau sensiblement augmenté, le nombre de pluviomètres dépassant 800 à partir de 1942.
- * Au début des **années soixante**, à la suite de la sécheresse dramatique de 1958, le réseau de mesure atteint sa taille actuelle, soit environ **2.500 pluviomètres, 250 pluviographes et 200 stations hydrométriques**, sous l'impulsion du Président KUBITSHECK et de la SUDENE, récemment créée. Cette accumulation de données n'empêchait pas CARVALHO (1960) d'affirmer dans un bulletin du DNOCS, que la pluviométrie moyenne du Polygone de la Sécheresse était de 400 mm alors que cette moyenne est de l'ordre de 650 à 700 mm.

■ Synthèses régionales antérieures à 1963

AGUIAR (1939, 40) a effectué une importante synthèse qui fournissait les éléments nécessaires au dimensionnement des barrages que les organismes chargés de lutter contre la sécheresse, comme l'IFOCs (puis le DNOCS), construisaient. AGUIAR a élaboré sa méthode et établi ses formules il y a plus de cinquante ans à partir des courtes chroniques existant à l'époque. Il ne disposait que des données hydrométriques d'une vingtaine de bassins, tous de surface supérieure à 500 km². Cependant la simplicité et la pertinence de ses formules les ont rendues célèbres et elles sont encore couramment utilisées de nos jours. On s'en sert pour le calcul des modules et des débits de crues des grands et même des petits bassins, pour lesquelles elles n'avaient pas été conçues. Nous y reviendrons.

Au début des années 60, la SUDENE entreprenait l'élaboration d'un certain nombre de documents synthétiques de base, comme une carte d'isohyètes qualifiée de "Dados in natura", encore utilisée. Les couvertures photographiques à diverses échelles, topographiques au 1:100.000^{ème}, pédologiques et géologiques à plus petite échelle (entre 1:500.000 et 1:1.000.000^{ème}) s'élaborent progressivement. O. PFAFSTETER (1957) publie une étude sur les intensités des fortes pluies au Brésil, encore utilisée aujourd'hui, mais il n'y a toujours pas d'étude hydrologique sur petits bassins !

1.2.2 Les années 60 : l'étude du Val du Jaguaribe ; les premières études sur petits bassins versants

Entre 1963 et 1966, le **Groupe d'Etude du Val du Jaguaribe** ou GVJ, créé par la SUDENE, qui recevait une assistance technique des organismes français ASMIC, SCET-COOP et ORSTOM, a entrepris l'étude hydroclimatologique et pédologique du grand bassin du Val du Jaguaribe, de près de 90.000 km², cours d'eau intermittent et situé entièrement dans la zone semi-aride de l'Etat du Cearà.

Cette étude était conçue pour déboucher, à court terme, sur des recommandations pratiques pour une planification et une bonne gestion des ressources naturelles. L'objectif fut en grande partie atteint et ce travail est encore, trente ans après, cité en exemple.

L'étude hydrologique représente une somme de travail impressionnante, effectuée en un temps record qui allie (à une époque où l'on ne disposait pas encore d'ordinateur) la collecte, l'homogénéisation, la critique et

le traitement d'une grande quantité de données brutes de tout type, suivie d'une synthèse régionale de haut niveau, qui contient implicitement ou explicitement plusieurs concepts de l'hydrologie moderne, qui ne s'épanouirent et ne furent vraiment formalisés que plusieurs années après.

Signalons plusieurs points et résultats remarquables dans la Monographie Hydrologique de l'Etude générale de base de Val du Jaguaribe (GVJ, 1967 ; DUBREUIL *et al*, 1968) :

- Un zonage hydrologique effectué avec le concept nouveau, à cette époque, de zones homogènes délimitées par superposition des cartes stylisées des principaux facteurs conditionnels des régimes (DUBREUIL, 1965a).
- Des formules et abaques régionaux permettant le calcul direct des modules hydrologiques à partir de la pluviométrie, de la composition géologique et de la couverture végétale des bassins. Nous y reviendrons.
- Les premières études hydrologiques spécifiques sur petits bassins (GVJ, 1965, Tome IV : Vol. 1; Vol. 2; Vol. 2-bis et Vol. 4), dont nous utiliserons les données.
- Une partie de ces études concerne spécifiquement le fonctionnement des petites retenues collinaires ou açudes déjà très nombreuses dans cette région; GIRARD (1966) propose, par exemple, une méthode de calcul de l'évaporation de ces retenues à partir des données sur bac et de la profondeur moyenne de ces réservoirs.
- DUBREUIL et GIRARD (1970) évaluent la réduction de l'écoulement provoquée par les très nombreux açudes existants sur un grand bassin.

1.2.3 Les années 70 : planification et installation d'un réseau de Bassin Versants Représentatifs

En 1973 la SUDENE, suivant les directives données par le Dr. M. S. CAMPELLO, lança un plan d'étude systématique des ressources en eau des petits bassins de tout le Nordeste. Les principales phases de ce plan, complet et ambitieux, élaboré et réalisé avec le conseil de l'ORSTOM, sous la supervision de P. DUBREUIL, ont été les suivantes:

■ Planification de l'implantation des BVR

J.F. NOUVELOT (1974) appliqua à tout le Nordeste la technique des zones hydrologiques homogènes qui avait été mise au point sur le Val du Jaguaribe (DUBREUIL 1968 et DUBREUIL et GUISCAFRE 1971).

Dans cette région de près de 1.600.000 km² NOUVELOT a ainsi identifié 229 zones homogènes différentes par rapport à des critères de pluviométrie, perméabilité du sous-sol, relief et altitude. En les regroupant, pour aboutir à un nombre raisonnable, il sélectionna 20 "grandes" zones prioritaires. Quatre de ces zones étaient déjà représentées avec une certaine redondance par huit bassins installés: MISSÃO VELHA, BATATEIRAS, CRATO, QUIXABINHA, JUATAMA, RIACHO DO NAVIO, SUME et ESCADA. Un calendrier, très ambitieux, prévoyait l'installation de seize autres bassins entre 1975 et 1981, à raison de deux

ou trois par an, chaque bassin devant être suivi durant cinq à dix ans selon l'hydraulicité et la qualité des observations.

■ Bassins installés

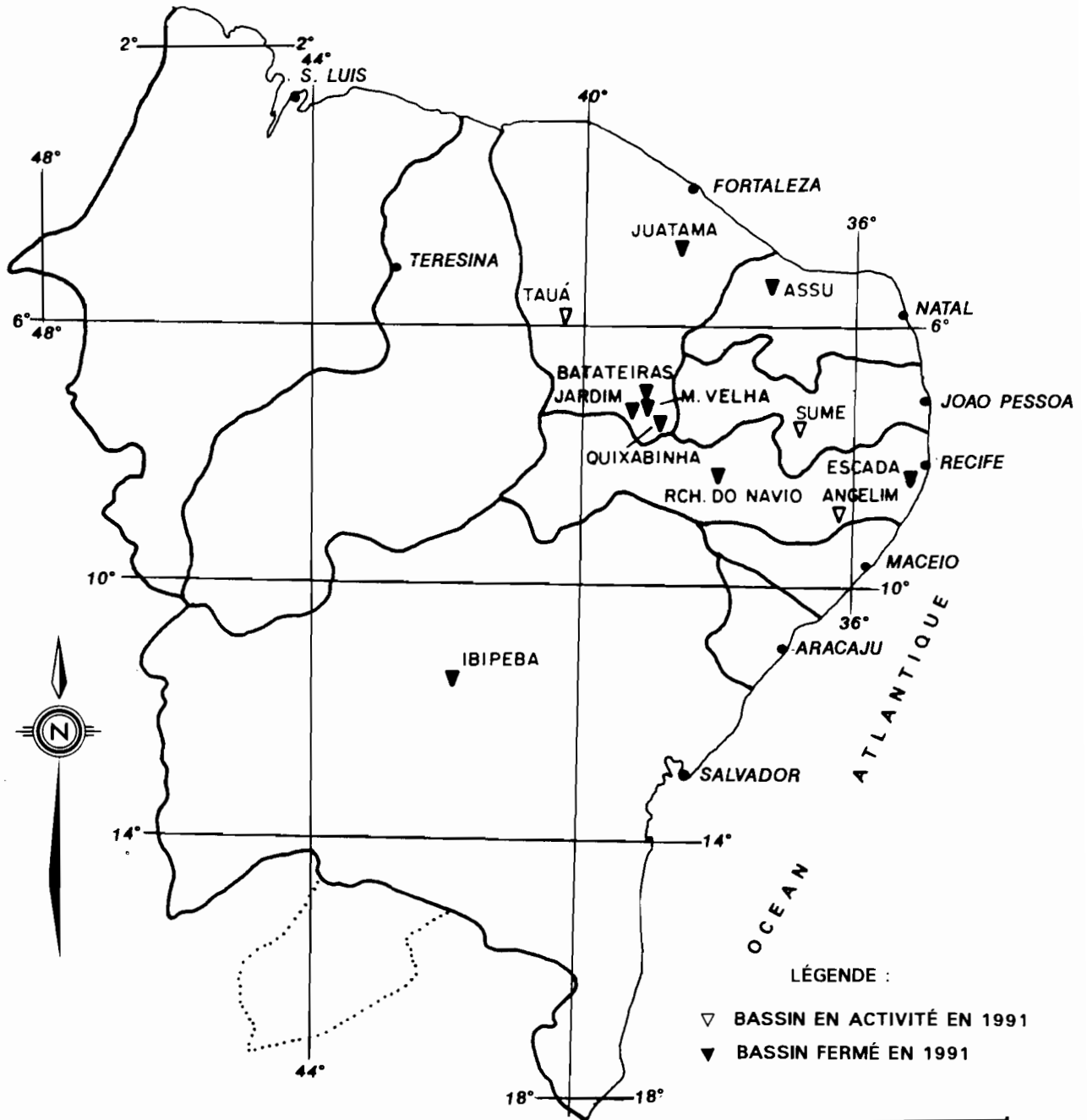
Quel est le bilan des études démarrées dans le cadre de la planification?

Les équipes de la SUDENE, dirigées par P.A. SANGUINETTI, avaient la capacité logistique de gérer simultanément trois ou quatre ensembles de bassins versants. Compte tenu des trois bassins de SUME, du RIACHO DO NAVIO et de JUATAMA, déjà en activité au moment de la publication de la planification de NOUVELOT, il a fallu fermer en 1977 les bassins du RIACHO DO NAVIO, de JUATAMA, puis d'ESCADA, pour pouvoir installer entre 1976 et 1978, trois des seize nouveaux bassins programmés. Ces trois nouveaux bassins sont tous situés dans la zone semi-aride: IBIPEBA dans la Bahia (BA) en 1976, TAUUA dans le Ceará (CE) en 1977 et AÇU dans le Rio Grande do Norte (RN) en 1978. Un seul bassin aura été finalement installé dans les zones "humides", celui d'ESCADA, dans la zone de canne à sucre proche de Recife, qui a été étudié entre 1975 et 1977. Ainsi, seulement sept des vingt "grandes" zones initialement prévues par NOUVELOT auront été effectivement couvertes.

Si l'on ne considère que les zones de pluviométrie inférieure à 800 mm, ce bilan s'améliore nettement et on atteint un taux de représentation de 50 %, ce qui est normal puisque dix des onze bassins étudiés sont situés dans le semi-aride qui ne représentait que la moitié du total des zones homogènes.

Cette planification a eu le mérite de présenter aux autorités le problème des études hydrologiques de petits bassins d'une manière rationnelle, de faciliter sa lisibilité globale et d'identifier les grands types de régime et de problèmes. Cependant, le fait de ne pas prendre en compte les types de sol et les couvertures végétales¹ constituent, on le sait maintenant, un handicap majeur à l'applicabilité pratique de cette planification et à son utilisation pour transposer les résultats dans les zones semi-arides.

1 Les cartes nécessaires pour cela n'étaient malheureusement pas encore disponibles au moment du travail de NOUVELOT.



BASSIN TAUA 1978-	BASSIN SUMÉ 1972-	BASSIN RCH. NAVIO 1970-1977	BASSIN JUATAMA 1964-1965 1974-1977	BASSIN IBIPEBA 1977-1981	BASSIN BATATEIRA 1962-1964	BASSIN ASSU 1979-1990	BASSIN ESCADA 1975-1977	BASSIN ANGELIM 1990-
SOUS- BASSINS PIRANGI MUNDO NOVO MOQUEM AÇ. J. FRAGOSO AÇUDINHO CALDEIRÃO AÇ. LUZIMAR AÇ. CHICO JUAZEIRO NASCIMENTI.	SOUS- BASSINS GANGORRA UMBURANA JATOBÁ	SOUS- BASSINS MATRIZ OSCAR BARROS SALOBRO	BASSIN CACHOEIRA DO ARACE	SOUS- BASSINS LA. GRANDE LAJ. DE BAIXO FAZ. ISABEL FAZ. PASSAG. LA. DO CANTO	BASSIN M. VELHA 1962-1964 BASSIN QUIXABIN. 1962-1964 BASSIN JARDIM 1962-1964	SOUS- BASSINS CASINHAS BUEIRO OLMO D'AGUA	SOUS- BASSINS US BARAO SERRA NOVA	SOUS- BASSINS BURACO D'AGUA PAU D'ARCO RIACHÃO

Figure 1.12 Carte de situation des bassins représentatifs du Nordeste brésilien

Il est de plus très regrettable que, pour des raisons de nature non technique, la dynamique très ambitieuse de ce programme de longue durée² et unique en son genre par son homogénéité et son envergure ait été brisée peu après l'installation d'une trop faible proportion des bassins prévus et avant l'obtention des premières synthèses et résultats qui auraient permis d'améliorer et de faire évoluer cette planification.

Nous disposons maintenant, quinze ans après, grâce aux travaux réalisés à l'occasion de la présente synthèse, d'éléments nouveaux qui permettent d'ajuster cette planification aux résultats obtenus et de définir ainsi des priorités dans les bassins à étudier en fonction des lacunes constatées dans les connaissances de leurs régimes.

1.2.4 Les années 80 : la diversification

Au cours de la décennie 1980 on assiste, d'une part à un ralentissement très net du "grand" programme des BVR, d'autre part, à la mise en place de plusieurs programmes, beaucoup moins ambitieux, qui répondent à des objectifs plus spécifiques et trouvent donc plus facilement des financements. Leurs coûts sont moindres et ils utilisent parfois une partie des ressources en hommes et en équipements du programme BVR. Ces programmes sont les suivants :

- Etudes sur **bassins expérimentaux**.
- Etudes de **conservation de sol**, LEPRUN (1981, 1983).
- **Développement de l'irrigation à partir des açudes**, qui comprend l'étude de la qualité des eaux des açudes.

Les connaissances acquises par ces différents programmes, ajoutées à l'expérience accumulée sur les BVR, constituent la base et sont la principale justification du présent travail de synthèse.

1.2.4.1 Ralentissement du Programme de Bassins Versants Représentatifs (BVR)

En 1980, quatre ans après le démarrage effectif de l'application de la planification de NOUVELOT, l'ensemble du programme était remis en cause, tout d'abord pour des raisons conjoncturelles :

- Modification des objectifs et des fonctions de la SUDENE, qui ne doit plus réaliser directement des programmes d'étude du milieu naturel. Les dirigeants ont changé et sont moins sensibles à la problématique hydrologique des petits bassins. Par ailleurs l'intérêt pour ce programme, qui n'est plus nouveau, s'émousse progressivement. Ceci va malheureusement de pair avec un accroissement général des difficultés économiques correspondant à la fin de ce que l'on a appelé le "miracle Brésilien".
- Le retard s'accumule dans l'élaboration des synthèses finales des bassins fermés³. L'installation et la gestion de nouveaux bassins est encore possible, mais elle ressemble à une fuite en avant puisqu'elle mobilise les énergies nécessaires à l'interprétation et à la synthèse des données déjà recueillies, qui constituent le but final de l'étude de chaque BVR. On s'aperçoit que les problèmes

² Ce programme avait été doté initialement des moyens suffisants en hommes (5 ingénieurs et 15 techniciens), matériel (25 limnigraphes, 30 pluviographes, 250 pluviomètres, des véhicules), fonctionnement, calcul, etc.

³ P. DUBREUIL, consultant du programme, suggère, en novembre 75, d'étaler le chronogramme prévu sur dix ou quinze ans et de faire appel à des Bureaux d'Etude brésiliens pour élaborer les rapports de synthèse finaux qui posent apparemment déjà problème... DUBREUIL s'est révélé clairvoyant; son scénario "catastrophe" destiné à alerter les responsables du programme pêche même par optimisme. Sur les quatre rapports de synthèse de BVR finalement publiés, un l'a été en 1979, les trois autres en 1989, dont deux élaborés par un bureau d'étude privé. Trois restent encore à faire.

de modélisation et d'interprétation sont plus complexes que prévu et qu'il est difficile, en 1980, d'éditer des normes et des recettes universelles utilisables pour tout type de bassin. Une pause est donc décrétée dans l'installation des bassins.

Mais il y a aussi des raisons plus techniques :

- Les essais de synthèse effectués en 1980 avec les résultats obtenus sur l'ensemble des bassins montrent que les variations du régime hydrologique peuvent être importantes à l'intérieur d'une même zone hydrologique homogène. Ceci implique deux changements dans les critères de sélection des bassins représentatifs :
 - Choisir des bassins beaucoup plus homogènes pour pouvoir mettre en évidence le rôle des différents facteurs. Pour cela, les nouveaux bassins devront être plus petits.
 - Choisir des bassins en fonction des **caractéristiques hydrodynamiques des sols, des états de surface et de leur couverture végétale**, facteurs non pris directement en compte par la planification initiale. Ceci rejoint l'évolution des concepts hydrologiques qui a eu lieu en Afrique à la même époque (COLLINET et VALENTIN, 1979; et CASENAVE *et al* 1982).
- Les aménageurs et les utilisateurs de l'information hydrologique se posent de nouvelles questions qui provoqueront, elles aussi, une réorientation des études :
 - Quel est le rôle de la couverture végétale et quelles sont les conséquences de ses diverses modifications sur les infiltrations, les écoulements, les crues, l'érosion et les pertes en éléments chimiques du sol ?
 - Comment recueillir des données nécessaires à l'étude et à la prévision de la qualité des eaux de surface pour pouvoir mieux combattre les problèmes de salinisation ?
 - Quels sont les paramètres nécessaires au dimensionnement et à la gestion des açudes, petites retenues collinaires qui constituent l'aménagement hydraulique le plus fréquent dans le Nordeste semi-aride ?

- Enfin, ensemble, les hydrologues et les pédologues cherchent à mesurer et à mieux comprendre certains mécanismes hydrologiques pour, par exemple, mieux caler des modèles ou faciliter les extrapolations. Ceci oriente les études vers une échelle et une analyse plus fine des mécanismes et des comportements, au détriment, parfois, de l'approche globale et régionale prévue par NOUVELOT.

Toutes ces raisons expliquent l'évolution des études hydrologiques sur petits bassins constatée au cours de la décennie 1980 :

Le Programme de Bassins Versants Représentatifs continue sur sa lancée mais son dynamisme est brisé. Quatre puis seulement trois bassins continuent à être gérés simultanément. Dans la décennie 1980, aucun nouveau bassin n'a été installé, entre celui d'AÇU en 1978 et celui d'ANGELIM en 1990 dans le Pernambouc. On est loin du rythme prévu par NOUVELOT !

Signalons une pause dans ce long déclin : en 1988-89, les responsables de la SUDENE manifestent un net regain d'intérêt pour ce programme de BVR. Le Dr. Marcelo BARROS , Coordinateur du PRN (Programme de Ressources Naturelles) de la SUDENE et le Dr. Benedito ZELAQUETT, Chef de l'HME (HydroMÉTéorologie) dépendant du PRN, fournirent les moyens nécessaires à l'élaboration des synthèses finales des trois bassins de TAUA, JUATAMA et IBIPEBA, au démarrage de celle de SUME et à l'installation d'un nouveau BVR à ANGELIM. Seules les synthèses d'AÇU et d'ESCADA n'ont malheureusement pas pu être entreprises.

Nous estimons que ces synthèses, effectuées dans des délais réduits, avec des techniques homogènes et modernes de saisie et de modélisation, en tenant compte des acquis des autres programmes sur bassins expérimentaux et de l'ATP, auront permis d'augmenter considérablement les connaissances relatives aux régimes et aux modes de fonctionnement hydrologique des petits bassins. Les résultats acquis durant cette période ont été l'une des motivations du présent travail.

En 1990, on observe un nouvel arrêt du programme d'études de BVR provoqué, cette fois, par la crise brutale et les restrictions drastiques et générales traversées cette année-là par toute l'administration et l'économie brésiliennes.

1.2.4.2 Les bassins expérimentaux

Au début des années 80, sous l'impulsion de la SUDENE, du CNPq et des deux universités du Nordeste dotées d'une formation de post-graduation en hydrologie (Campina-Grande dans l'Etat de Paraíba et Fortaleza dans celui du Cearà) et toujours avec l'appui de l'ORSTOM, était lancé un nouveau programme appelé "bassins expérimentaux".

Le premier des bassins expérimentaux a été installé à SUME fin 1981 par les équipes de la SUDENE, sous la direction de G. GUSMÃO, du PRN et la responsabilité technique de P.A. SANGUINETTI, puis de H.P. VIEIRA. L'orientation technique de l'ORSTOM était assurée par E. CADIER et J.C. LEPRUN. Les appareils installés sont directement inspirés de ceux mis en place par l'ORSTOM à TAI en Côte d'Ivoire (COLLINET 1984). Leur objectif est de mesurer les conséquences sur les écoulements et l'érosion des modifications de la couverture végétale. A plus long terme ce projet vise la détermination des normes de dimensionnement et de gestion des açudes. De fortes crues survenues et correctement mesurées dès la première campagne de mesure ont permis de mettre en évidence un accroissement des écoulements d'un facteur variant entre 5 et 10 provoqué par la suppression de la végétation. Ces résultats rapidement obtenus et inédits, alliés à l'appui du Dr. IVONILZO du CNPq et à celui du projet de coopération française (qui allait devenir le projet TAPI), dirigé par J.L. MILLO, ont sans doute assuré la continuité de l'ensemble du programme d'études de petits bassins (Programme BVR) qui était fortement remis en question dans ces années 1982-83. Ce programme de recherche fondamentale s'étalait en effet sur une période beaucoup trop longue au gré des responsables politiques et du développement.

Ce premier bassin expérimental a été installé sur une zone de sols bruns non calciques vertiques à l'intérieur du BVR de SUME et utilisait largement ses facilités logistiques: réseau de mesure, équipement, véhicules, observateurs et hébergement. Ce n'est qu'à partir de 1984 que les chercheurs de l'Université de Campina Grande ont assuré progressivement la conduite de cette recherche qui continue en 1991, (prof. H. P. GOMES, V.S. SRINIVASAN et C. GALVÃO).

Entre 1986 et 1989 un Programme de recherche franco-brésilien visant l'étude du fonctionnement hydrologique des écosystèmes du Nordeste brésilien, a fait l'objet d'un contrat d'ATP-PIREN entre l'ORSTOM, le CNRS et divers organismes brésiliens. L'objet d'étude de ce programme de recherche a été le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique des sols bruns non calciques vertiques de SUME. Il a, bien évidemment, utilisé largement les infrastructures et des résultats du programme du Bassin Expérimental de SUME.

En 1984 le CNPq approuvait le financement de trois autres projets de recherche sur Bassin Expérimental inspirés de celui de SUME pour les Universités des Etats du Pernambouc, du Rio Grande do Norte et du Ceará. Seul celui de l'Etat du Ceará, doté d'un cours de post-graduation en hydrologie, devait voir le jour, les responsables universitaires pressentis dans les deux autres Etats n'ayant pas pu s'investir suffisamment pour assurer l'installation des bassins.

Le bassin expérimental de TAUA a été installé à partir de fin 1985 à l'intérieur du BVR de TAUA, sous la responsabilité du Prof. Walter MARTINS de l'Université Fédérale du Ceará, avec le conseil de la SUDENE et de l'ORSTOM. Les dispositifs de mesure sont similaires à ceux de SUME, mais leurs bassins ont été choisis pour comprendre le fonctionnement et tenter de représenter les régimes des principaux éléments de la véritable mosaïque de sols qui compose le BVR et non pour mesurer, comme c'était le cas pour SUME, les effets d'une modification de la végétation. De plus, on a associé à cette étude de microbassins le suivi de bassins plus grands. Ainsi les écoulements entrant dans sept açudes et un bassin englobant les parcelles et micro-bassins sont mesurés. La comparaison des différences des régimes avec les caractéristiques physiographiques des différents bassins et sous-bassins sera riche en enseignements. Elle permettra d'ébaucher une typologie hydrologique des bassins de cette région qui peut être utilisée pour des transpositions de résultats hydrologiques.

1.2.4.3 L'étude des açudes

Les études hydrologiques sur les petits bassins du Nordeste semi-aride ont toujours contenu, de manière plus ou moins implicite, un volet concernant les açudes, qui constituent, rappelons-le, le type d'aménagement des eaux de surface le plus répandu.

Ce fut le cas pour les études du GVJ qui avaient réuni les éléments nécessaires à l'évaluation des modifications des régimes hydrologiques d'un bassin de 2.000 km² dues aux açudes. P. DUBREUIL et GIRARD (1970) ont étudié également le fonctionnement des açudes selon différents scénarios de remplissage.

En 1981, l'un des objectifs du projet hydrologique appelé "*bassin expérimental*" était l'établissement de normes de dimensionnement et de gestion d'açudes. Ce programme de recherche reçut à cette époque l'appui de la partie de la SUDENE chargée du développement (Dr. João PESSOA) et de l'équipe de Coopération Française en irrigation qui lui était associée en la personne de Jean Louis MILLO et de Marc LEFEBURE DU BUS. Une première version du gros modèle POMAC de dimensionnement et de gestion de retenue a été mise au point à cette époque. Malheureusement, la grande sécheresse de 1982-1983 assèche tous les petits açudes et diminua fortement l'enthousiasme des aménageurs, peu enclins à financer un programme de diffusion de techniques d'irrigation, dont l'alimentation en eau avait disparu... Ce programme fut donc mis en veilleuse, moins de deux ans après avoir commencé.

Le "Programme Açudes" 1985-91 :

Deux ans plus tard, à la fin de l'année 1985, la situation était bien différente: pratiquement tous les açudes du Nordeste s'étaient remplis à la suite d'une saison des pluies très abondante qui estompait le souvenir dramatique des années précédentes. Le gouvernement brésilien lança, à cette époque, avec l'appui de la Banque Mondiale un gigantesque Programme d'Appui au Petit Producteur (PAPP), dont le budget était de 5 milliards de dollars, étalé sur cinq ans. La SUDENE était chargée de la coordination de ce plan et M.S. CAMPELLO assurait la direction du volet relatif aux ressources hydriques et à l'irrigation.

A cette même époque F. MOLLE, Ingénieur du Projet Français de Coopération de Technologies Appropriées pour la Petite Irrigation (TAPI) auprès du PAPP, démarrait une fructueuse et dynamique collaboration entre chercheurs et aménageurs. Un nouveau projet a été ainsi créé, associant des techniciens issus de deux directions différentes de la SUDENE, la DPG/PRN et la DPP(PAPP)/RHD, et de deux organismes français, l'ORSTOM et le projet TAPI dépendant directement du Ministère Français des Affaires Etrangères (MAE).

Objectif du Programme Açude :

Les objectifs et les motivations de ce programme sont basés sur quelques idées simples :

- Il existe dans le Nordeste près de **70.000 petits et moyens açudes** (MOLLE, 1991b) qui sont notoirement sous-utilisés, la plus grande partie de leur eau se perdant par évaporation.
- On peut souvent, à peu de frais, **valoriser ces retenues** en utilisant, par exemple, des techniques d'irrigation gravitaire, de pisciculture ou de cultures de décrue, etc.
- Un certain nombre de ces techniques existe déjà. Elles doivent être recherchées dans la littérature. D'autres doivent être testées, adaptées ou créées dans le contexte nordestin, en particulier en ce qui concerne la réceptivité des paysans.
- Pour permettre la diffusion de ces techniques, il faut élaborer et diffuser un **manuel** qui permettra de :
 - . sélectionner les projets viables ;
 - . établir des règles de dimensionnement, d'implantation et de gestion des périmètres, des açudes et de leurs déversoirs ;
 - . donner les indications techniques nécessaires à l'irrigation (siphons, drainage...), à la pisciculture (sélection d'espèces et alimentation des poissons) et aux autres utilisations des açudes (cultures de décrue, etc.).

Lignes d'actions du Programme Açudes :

Entre 1985 et 1991, ce projet s'est développé en suivant cinq lignes principales :

Au bureau :

- 1) Rassemblement, traitement et homogénéisation la plus complète possible de toute l'**information déjà existante** qui est souvent beaucoup plus abondante et hétérogène que l'on ne l'imagine.
- 2) Développement et calage de **modèles** conçus pour aider à dimensionner et à gérer les açudes et leur périmètre.
- 3) Rédaction du **Manuel** du petit Açude (MOLLE et CADIER 1991), qui constituait l'objectif principal de ce programme.

Sur le terrain :

- 4) Suivi agronomique et hydropluviométrique d'un certain nombre de projets d'irrigation appelés "**Projets pilotes**", permettant de mieux comprendre certains aspects du fonctionnement des systèmes d'irrigation, de les modéliser, de cerner leurs points critiques et de leur permettre de servir éventuellement d'exemple de démonstration, facilitant ainsi la confection du manuel.
- 5) "**Test en grandeur réelle**" des techniques recommandées en laissant, cette fois, la responsabilité de la conception, du financement, de la construction et de l'encadrement de la gestion des projets d'irrigation aux organismes locaux. Ceci fut réalisé **avec succès** par le PAPP et le projet TAPI dans la région de PINTADAS, dans l'Etat de la Bahia, entraînant ainsi la construction d'une trentaine de barrages et l'implantation d'un nombre égal de projets d'irrigation.

Résultats du Programme Açude :

Ce programme très dynamique survient dans une conjoncture favorable. Les açudes sont pleins, le Gouvernement brésilien a choisi l'irrigation comme moyen prioritaire de développement du Nordeste et le petit producteur est LA priorité affichée du programme milliardaire du PAPP. Les objectifs de ce programme açude sont concrets, bien définis et présentent un intérêt pratique.

Ses résultats se situent sur plusieurs plans :

- a) Résultats directement prévus par le programme: réalisation de manuels, séminaires, films de formation, etc...
- b) Retombées techniques et scientifiques: pour combler des lacunes, un certain nombre d'études de base ont été entreprises et ont correspondu à des progrès substantiels des connaissances relatives aux petits açudes en allant bien au delà des objectifs minimums du Programme Açude. Citons, par exemple :
 - . La méthode de classification et de transposition hydrologique présentée à la fin de cet ouvrage.
 - . Une étude des processus de concentration en sel des retenues qui a fait l'objet d'une thèse (LARAQUE 1991) et de diverses publications (MOLLE 1991c).
 - . Des études de base sur la variation de l'évaporation et de l'infiltration en fonction de la taille et du type d'açude (MOLLE 1989a et b).
 - . Une étude de la morphométrie (ou géométrie) des cuvettes des petites retenues (MOLLE 1991a).
 - . Une actualisation de l'inventaire des açudes (MOLLE 1991b).
 - . Une étude historique des açudes (MOLLE 1991b).
 - . Réunion de l'information existante et publication de documents synthétiques sur la pisciculture, les cultures de décrue, etc. (MOLLE et CADIER 1991).
 - . Mise au point de modèles de recherche tels que POMAC sur le fonctionnement des barrages (CADIER *et al*, 1989, CADIER *et al*, 1990, MOLLE, 1991c).

- . Obtention de nouvelles données hydrologiques sur le fonctionnement des bassins versants d'alimentation des "projets pilotes".

c) Effet d'"entraînement".

Ce programme dynamique, aux objectifs pratiques et convaincants saura obtenir l'appui financier ou la participation concrète d'organismes externes tels que :

- Le PROVARZEAS, Programme de mise en valeur de bas-fond dans le centre et le Sud du Brésil attaché au Ministère Fédéral de l'Agriculture - appuyé par la FAO - qui s'est montré très intéressé par la conception des études, le manuel et la diffusion des techniques mises au point.
- Le PRONI, Programme National d'Irrigation dépendant du Ministère Fédéral de l'Irrigation et soutenu par la Banque Mondiale.
- Le BUREC, "Bureau of Reclamation" des Etats Unis d'Amérique travaillant pour le PRONI.
- La CAR, organisme de l'Etat de la Bahia qui appuya et finança le "test en grandeur réelle" de PINTADAS.
- La CISAGRO, organisme de l'Etat du Pernambouc, qui participa à deux inventaires et à une analyse au niveau de la microrégion, de la répartition et du fonctionnement des açudes (SUDENE/TAPI/CISAGRO, 1988 ; SUDENE/TAPI/CISAGRO, 1989).

Ce programme aura provoqué une relance brève mais intense des études hydrologiques de base sur Bassins Versants Représentatifs (BVR) de la SUDENE, qui s'est traduit par la réalisation de la plupart des synthèses en souffrance dont les données risquaient plus, chaque jour, d'être définitivement perdues. Les connaissances nouvelles acquises à cette occasion auront été l'une des principales motivations de l'élaboration du présent mémoire.

Du côté français des moyens supplémentaires ont été également dégagés, pour ce Programme Açudes. L'accord de coopération avec l'ORSTOM est prolongé de trois ans; l'équipe française ORSTOM/TAPI est renforcée.

1.2.5 Information hydrologique fournie par les différents programmes

Essayons de dresser un bilan de l'information hydrométéorologique recueillie par les programmes cités, qui ont étudié divers aspects de l'hydrologie des petits bassins au cours de ces 25 dernières années.

Nous comparons, tout d'abord, le nombre d'appareils installés et le nombre de stations-années recueillies.

TABLEAU 1.1 : Nombre d'appareils installés et information fournie par les différents programmes

TYPE DE MESURE	NOMBRE D'APPAREIL INSTALLÉS					NOMBRE DE STATIONS x ANNÉES						
	PROGRAMME	GVJ	BVR	BVE	AÇUDE	TOTAL	GVJ	BVR	BVE	AÇUDE	TOTAL	TOTAL
											jusqu'à 1980	jusqu'à 1990
Ensemble de BVR		4*	7*	-	-	10	8	58	-	-	34	66
Limnigraphe		5	30	12	-	47	10	161	52	-	81	223
Limnimétrie sur açude		6	43	-	12	61	12**	351	-	40**	107	403
Pluviomètres		72	306	10	12	400	144	2530	110	40	1404	2824
Pluviographes		13	44	6	3	66	26	335	66	12	227	439
Station Météorologique		2	8	-	-	10	4	58	-	-	32	62
Microbassin Parcelle		-	-	8	-	8	-	-	52***	-	-	52***
		-	-	10	-	10	-	-	65	-	-	65
TOTAL		102*	438*	34	27	612	204	3493	293	92	1885	4084

* Le Bassin de JUATAMA, installé par le programme GVJ, a été réinstallé par celui des BVR.

** Un suivi mensuel de la qualité chimique des eaux de 60 Açudes a été organisé par A. LARAQUE entre 1987 et 1989.

*** Les 52 stations-années des microbassins n'ont pas été comptabilisées, puisqu'on avait déjà pris en compte leurs limnigraphes.

Sigles des programmes :

GVJ : Groupe d'étude du Val du Jaguaribe, 1963-67.

BVR : Bassins Versants Représentatifs, 1973-91...

BVE : Bassins Versants Expérimentaux (SUME et TAUA), 1981-91...

AÇUDE : Développement de l'irrigation à partir des Açudes, 1985-91.

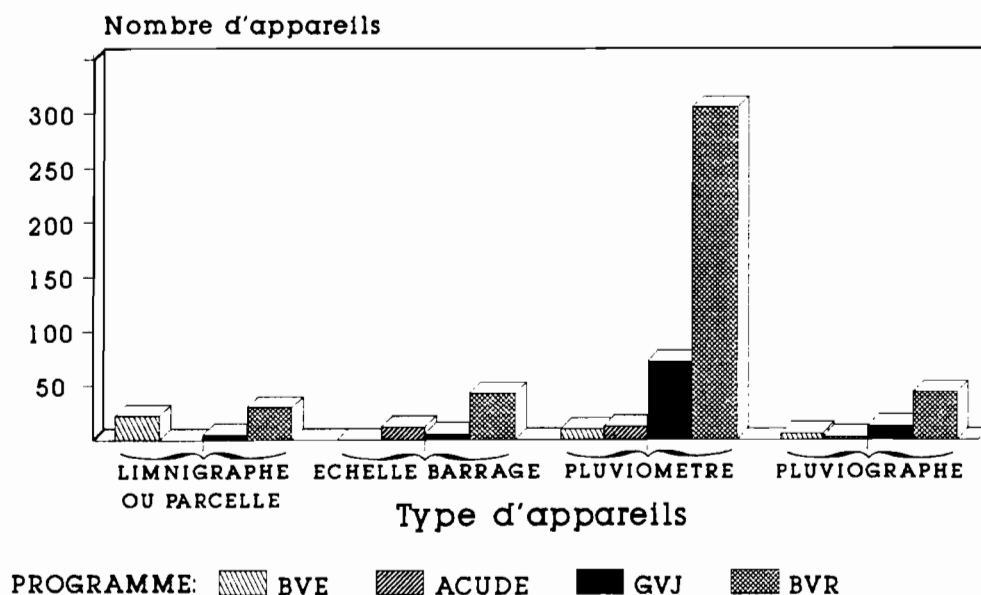


Fig 1.13 : Nombre d'appareils installés par les différents programmes.

Ce tableau appelle quelques commentaires :

- Le nombre d'appareils installés par le GVJ représente 17 % de l'ensemble, mais le nombre de stations-années ne représente plus que 5 % de la masse d'informations recueillie. Les bassins du GVJ n'ont été, en effet, suivis que pendant de très courtes périodes.
- Le volume d'informations recueillies jusqu'à 1980 représente à peu près la moitié du volume total recueilli jusqu'à 1990.
- Au cours de la période 1981-90, on observe un accroissement proportionnellement plus fort des observations sur **parcelles et microbassins** (qui n'existaient pas avant) et des observations **limnimétriques sur açudes**. Cet accroissement est surtout dû à une intensification de ce type de mesures sur les BVR de TAUA, SUME et AÇU. Le développement des mesures sur les açudes correspond à la prise de conscience de l'intérêt et du faible coût que représente leur suivi pour améliorer les connaissances hydrologiques. Les açudes étaient surtout, jusqu'alors, considérés comme des *"empêcheurs de modéliser en rond"*, qui compliquaient les fonctionnements des bassins et que l'on ne savait pas prendre en compte correctement, vu leur grand nombre. En fait ces açudes ont finalement permis de remplacer à peu de frais certaines stations hydrométriques. Ainsi 11 des 42 modèles calés proviennent des données des açudes.
- Le faible volume des informations recueillies sur le programme Bassin Expérimental, qui représente moins de 7 % de l'ensemble ne rend pas compte de l'excellente qualité et de l'homogénéité de ces données. De plus les appareils de ces bassins expérimentaux ont été installés pour éclairer des points précis des mécanismes hydrologiques et ont été associés au programme de recherche fondamentale plus "pointu" de l'ATP-PIREN ORSTOM-CNRS. L'apport de ces bassins expérimentaux dans les connaissances actuelles des fonctionnements des petits bassins est donc fondamental.
- Le Programme Açude ne représente qu'une part très modeste du volume total de l'information recueillie (à peine 2 %). Circonstance aggravante, trois seulement des douze açudes suivis, ont fourni des chroniques hydropluviométriques de qualité et de longueur suffisante pour permettre l'ajustement d'un modèle, ce qui est, rappelons-le, une condition nécessaire à l'intégration des données de ces açudes dans l'ensemble de celles qui sont utilisées pour l'élaboration de la méthode de transposition. Plusieurs raisons expliquent ces résultats décevants sur le plan hydrologique⁴ :
 - . Brièveté de la période d'observation.
 - . Les deux ou trois années observées ont eu, en général, une distribution saisonnière des précipitations peu favorable à l'accroissement de l'information hydrologique. On a en effet trop souvent observé le schéma suivant: une très grosse averse, en début de saison des pluies fait déborder l'açude en empêchant ainsi de mesurer par limnimétrie le volume des crues suivantes.

4 Par contre les résultats du Programme Açude ont été extrêmement positifs et riches en enseignements en ce qui concerne la gestion de l'eau et les techniques d'irrigation.

. Qualité souvent médiocre des données due à la très faible quantité d'appareils installés (1 pluviomètre, parfois 1 pluviographe et une batterie d'échelles limnimétriques) qui complique la détection et la correction des erreurs. Le niveau et parfois la motivation des observateurs sont souvent faibles.

Toutes ces imperfections sont en partie dues au caractère prioritaire du suivi agronomique des zones irriguées par rapport au suivi hydrologique, ce qui est normal pour un programme d'irrigation.

- Enfin, donnons quelques chiffres pour situer le volume d'informations recueillies par rapport au contenu de la banque de données hydrométéorologique de la SUDENE (GUSMÃO *et al*, 1979) :

. Les 2824 années de pluviométrie recueillies sur les bassins représentatifs ne représentent que 3,4 % du volume des données pluviométriques saisies pour l'ensemble du Nordeste.

. Environ 300 des 439 stations-années de pluviographie des petits bassins ont été saisies et incluses dans la banque de données de la SUDENE. Ceci représente à peu près 50 % de l'information pluviographique totale de la banque.

DEUXIEME PARTIE

2. TECHNIQUES HYDROLOGIQUES UTILISÉES

Quelle hydrologie pour quels petits bassins ?

2.1 PROBLÉMATIQUE ET SPECIFICITE DE L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS

L'hydrologie des petits bassins a connu des bonheurs très divers dans les différentes régions du monde.

Outre certaines raisons conjoncturelles difficilement prévisibles, deux grands facteurs peuvent expliquer l'amplitude et l'orientation prises par ces études hydrologiques spécifiques :

- Les motivations existantes,
- Les moyens disponibles.

2.1.1 Pourquoi étudier les petits bassins ?

Les motivations qui ont déclenché les études sur petits bassins sont très diverses et sont formulées de manière plus ou moins explicite, consciente et cohérente. Essayons de les regrouper :

■ Résoudre les problèmes directement liés à la mise en valeur des ressources en eau

L'information hydrologique requise peut être de nature très variée :

- Informations sur les **crues** : prévision en temps réel des débits et hauteurs d'eau des crues, pour mettre en place des systèmes d'alerte ou calcul des caractéristiques des "crues de projet".
- Informations sur les **volumes écoulés globaux** : modules en année moyenne ou en année déficitaire; distribution et irrégularité saisonnière des écoulements.
- Connaissance et prévision des **débits d'étiage** nécessaires, par exemple, à la conception des projets d'aménagement au fil de l'eau ou intervenant dans les problèmes de pollution des cours d'eau ou des aquifères.

- Informations sur la **qualité des eaux** : transports de sels, l'origine et la propagation des pollutions et interactions entre les aquifères et les cours d'eau.

Le type d'étude qui permet de répondre à ces différentes questions sera évidemment très différent selon la région du monde: région tempérée, avec ou sans gel, région tropicale humide ou aride, prépondérance ou non des écoulements de base sur le ruissellement, etc. De plus il convient de distinguer l'étude d'un site spécifique, par exemple l'alimentation d'une ville ou d'une usine, de la détermination régionale de caractéristiques hydrologiques.

■ Améliorer les connaissances hydrologiques d'une région

Ce deuxième type de motivation n'est pas directement lié à un problème précis de mise en valeur, mais rien n'empêche, évidemment, d'utiliser plus tard pour cela les résultats obtenus.

Nous pouvons classer dans cette catégorie :

a) Les études, sur petits bassins, visant à mieux comprendre le fonctionnement des grandes rivières.

- . Ainsi l'étude des bassins versants de la COMBA au Congo, MOLINIER (1981), a permis en 1957 de mettre en évidence et de quantifier le rôle prépondérant du plateau des Cataractes dans la genèse des crues du fleuve KOUILOU.
- . L'étude des mayos du Nord Cameroun a permis d'évaluer le rôle exact et la contribution des zones montagneuses aux inondations survenant chaque année dans les Yaérés, grandes plaines endoréiques liées au fleuve LOGONE, lui-même aboutissant au lac TCHAD.
- . L'objectif principal des petits bassins représentatifs installés dans le cadre de l'étude du VAL DU JAGUARIBE, au Brésil, était de mieux connaître le fonctionnement et les ressources hydriques des deux grandes zones géologiques cristalline et sédimentaire de ce bassin qui couvre une surface de près de 90.000 km².

b) Les études visant à mieux connaître les mécanismes hydrologiques.

Ce type de recherche, plus fondamentale, n'a pas pour objectif de répondre directement aux questions posées par les aménageurs, mais correspond à des préoccupations plus scientifiques qui cherchent à mieux comprendre les mécanismes de génération ou de transfert des écoulements ou à vérifier une hypothèse ou une théorie. Ces études conduisent parfois à un saut qualitatif des connaissances qui peuvent se traduire, par exemple, par une amélioration des **modèles** dans le sens d'une plus grande fidélité ou aptitude à être transposé. Dans cette catégorie rentrent les recherches et expérimentation sur **parcelles**, **lysimètres**, **profils hydriques** ou mesures sur **monolithes** et les techniques de **simulation de pluie**.

c) Les études à but didactique.

Les organismes chargés de la formation en hydrologie disposent souvent de "bassins-écoles" qui fournissent un champ d'expérimentation et de démonstration de taille réduite et permettent d'assurer une formation de terrain de manière pratique. Sur ces bassins les chercheurs mènent souvent des recherches fondamentales mentionnées au point précédent.

■ Choix et motivations induits par l'existence de moyens

Les moyens en personnel (nombre et compétence des techniciens), en équipement et en crédit de fonctionnement sont nécessaires au bon déroulement des études. Leur existence est souvent déterminante pour la définition des programmes...

Combien d'études ont été décidées, suite à l'apparition de crédits ? Combien de fois le nombre de sous-bassins a plutôt dépendu du nombre de limnigraphes existants que de la complexité de l'objet hydrologique à étudier ?

2.1.2 Contraintes et techniques propres aux petits bassins

La petite taille des bassins impose un certain nombre de contraintes qui différencie leur hydrologie de celle des grandes rivières.

2.1.2.1 Métrologie

. Les petites surfaces engendrent des **débits plus faibles**, ce qui rend les mesures plus aisées, et permet souvent d'utiliser des appareils spécifiques comme des déversoirs, seuils jaugeurs ou section stabilisée par des radiers. L'utilisation de micro-moulinets est parfois indispensable. Par contre les lits des rivières, près des têtes de bassin présentent souvent des fortes pentes qui provoquent une **augmentation des vitesses** et des phénomènes d'**érosion** qui diminuent la stabilité des sections et compliquent les mesures de débit.

TABLEAU 2.1 : Comment résoudre les problèmes hydrologiques des petits bassins

PROBLEME	SOLUTION
Très grand nombre de bassins et de situations.	<ul style="list-style-type: none"> - Zonage des facteurs conditionnels. - Identification des caractéristiques hydrologiques à étudier en priorité pour chaque région. - Typologie des bassins. - Planification des études.
L'estimation directe des paramètres hydrologiques (crues, modules de diverses fréquences, etc.) exige de très longues périodes d'observation.	<p>Techniques de modélisation permettant de simuler une longue période de fonctionnement du bassin à partir des deux éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un modèle de simulation calé et validé; - une longue série pluvio et climatologique.
Rapidité et fugacité des phénomènes	<ul style="list-style-type: none"> - Techniques de mesure spécifiques. - Présence permanente sur le terrain, en saison des pluies de techniciens spécialement formés.
<p>L'étude hydrologique des petits projets d'aménagement doit être :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rapide - simple - bon marché. 	<p>Mise au point de méthodes de transposition régionale, qui permettent le dimensionnement des ouvrages dans des mesures hydrologiques directes.</p>

. Les variations de débit sont beaucoup plus rapides sur les petites surfaces. Ceci complique leur mesure. Il faut souvent jauger de nuit, parfois avant la fin de la pluie. On doit, en cas de variation rapide du niveau d'eau, employer des techniques telles que le jaugeage par **verticales indépendantes**¹ ou des méthodes permettant de corriger la **non-univocité** des étalonnages. La rapidité et la fugacité des phénomènes imposent de travailler vite, de disposer d'équipes et de matériel rodés et rendent souvent irrécupérable toute fausse manoeuvre.

1 La technique de jaugeage par verticales indépendantes consiste à établir une courbe d'étalonnage pour chaque verticale. Elle présente l'avantage de diminuer l'imprécision du jaugeage due aux variations de cote, en la limitant à celle qui se produit pendant le temps nécessaire aux mesures sur une seule verticale. On doit appliquer cette technique chaque fois que la variation de cote dépasse 10 à 15 cm par heure.

- . Il faut assurer une parfaite **synchronisation** des différents appareils enregistreurs (limnigraphes et pluviographes) avec les montres et chronomètres des techniciens. Des **appareils de mesures avec saisie sur support informatique et horloge électronique** sont souhaitables. Ils permettront une analyse automatique, précise et fiable des enregistrements.

Si l'on étudie les transports solides et que l'on cherche à étudier, par exemple, la forme des turbidigrammes, il sera très utile de pouvoir disposer d'un échantillonneur automatique piloté par microprocesseur. Ce genre d'appareil est souvent de conduite très délicate.

- . Les petites rivières, surtout dans les zones sèches, sont souvent **intermittentes**. Ceci complique et rend moins fiable le fonctionnement des limnigraphes, pour les raisons suivantes :
 - obstruction par des animaux ou des dépôts des tuyaux ou canaux de communication avec le cours d'eau ;
 - impossibilité de tester le fonctionnement du flotteur quand il n'y a pas d'eau dans la rivière ;
 - les dépôts de sédiments sous le flotteur induiront un décalage fâcheux entre les cotes sur l'enregistrement et le niveau limnimétrique réel.

2.1.2.2 Hétérogénéité des petits bassins

Les bassins de petite ou de très petite taille peuvent être plus sensibles aux **hétérogénéités locales** qui se compensent souvent entre elles sur des bassins plus grands. Ces hétérogénéités sont indécélables avec les documents cartographiques existants. On peut citer, par exemple, les variations du type d'altération dues à un changement du pendage géologique, qui ne pourront être expliquées, avec certitude, qu'après ouverture d'une tranchée. Les variations pédologiques extrêmement rapides que l'on observe à TAUA ou à SUME en offrent un bon exemple. On constate, sur ces bassins, des variations inattendues des écoulements entre deux microbassins en apparence semblables.

Il est difficile de contrôler ce qui se passe réellement aux limites d'un tout petit bassin. Il est possible que la limite topographique du bassin ne coïncide pas avec la ligne de séparation des écoulements souterrains. Il se peut aussi que la partie du flux hydrique contrôlé par l'exutoire, dépende de la taille du bassin comme l'a montré FRITSCH (1990) pour les bassins d'ECEREX en GUYANE FRANÇAISE.

2.1.2.3 Notion de représentativité, nécessité de planification

Puisqu'ils sont très petits, ils sont très nombreux ! Il est déraisonnable de proposer l'étude de tous les petits bassins d'une région donnée.

Il faut donc choisir, mais comment ?

L'idée de choisir certains bassins susceptibles d'en représenter un plus grand nombre vient tout naturellement à l'esprit. Pour cela il faut établir une typologie et définir qui va représenter quoi. Ce concept a mûri au fil des années. Initialement les premiers bassins représentatifs étaient choisis pour représenter "la partie nord et montagneuse de tel grand bassin" ou "la partie de tel bassin sur schiste et couverte de telle végétation". Quand le nombre de bassins et de zones se multiplie on arrive vite à une liste augmentant de façon anarchique, difficilement séparable de son contexte et inintelligible pour qui ne connaît pas la région.

DUBREUIL (1965a) et DUBREUIL et GUISCAFRE (1971) ont proposé le concept de **zone hydrologique homogène** qui consiste à diviser la région étudiée en zones à l'intérieur desquelles **chacun des facteurs conditionnels des régimes hydrologiques ne présente qu'une faible variation**. Dans chacune de ces zones les régimes hydrologiques ne devraient donc ne présenter, eux aussi, que de faibles variations. Ce zonage permet d'identifier les principaux types de bassins existants et donc d'établir de manière rationnelle **la liste des bassins qu'il faudra étudier**. Ceci a été réalisé par NOUVELOT en 1974 dans le Nordeste brésilien et semble un préalable indispensable à toute tentative d'étude générale des régimes hydrologiques de petits bassins.

Cette technique de planification souffre cependant de deux défauts, liés à sa conception :

- Comment choisir les facteurs conditionnels des régimes hydrologiques et leurs limites pour effectuer le zonage alors que l'on ne connaît pas encore ces régimes ?
- Cette approche régionale ne prend pas en compte les variations des caractéristiques des sols et de la végétation le long des versants, c'est à dire en suivant ce que l'on appelle une toposéquence. L'organisation et l'ordre d'apparition des différents sols dans ces toposéquences est un facteur déterminant des régimes.

L'un des remèdes peut être, comme l'a fait l'EMBRAPA (1991), d'identifier de grandes zones homogènes, appelées **Unités de paysage**. A l'intérieur de ces unités de paysage il faut identifier les principaux types de petits bassins que l'on rencontre. Nous y reviendrons.

2.1.2.4 Techniques d'homogénéisation, d'extension de série et de modélisation

Mis à part le cas de quelques rares petits bassins de référence appelés "*bench mark basin*"² par les anglo-saxons, on ne mesure pratiquement jamais le comportement des petits bassins durant une période suffisamment longue pour que les observations aient une quelconque signification statistique directe. Ceci s'aggrave dans les zones arides où les écoulements sont encore plus irréguliers. On a ainsi montré sur le bassin représentatif de TAUA que la moyenne des écoulements observés pendant dix ans était supérieure de 40 % à la moyenne interannuelle estimée, alors que la moyenne pluviométrique de ces mêmes dix ans était proche de la moyenne interannuelle. Cet exemple montre que, dans le Nordeste brésilien, une durée de dix ans d'observations est nettement insuffisante. Faut-il attendre trente, cinquante ou cent ans ? Ces durées sont prohibitives et justifient l'utilisation de techniques d'homogénéisation, d'extension de séries et de modélisation.

Ces techniques consistent à corriger les écoulements observés en fonction des caractéristiques spécifiques de la période qui leur a donné naissance.

Ces corrections ou cette homogénéisation sont souvent effectués par le biais d'un **modèle** calé sur la période observée, qui calcule les écoulements en fonction de chroniques des pluies et d'autres paramètres climatiques. Ces modèles, une fois calés, sont utilisés pour générer des séries fictives dites de "longue durée" à partir de données pluviométriques fiables et représentatives de la région. Les écoulements ainsi générés font l'objet d'une analyse fréquentielle, qui permet, en principe, de **s'affranchir de la période réellement observée**.

La rapidité des phénomènes sur les petits bassins, rend souvent nécessaire l'utilisation de **modèles spécifiques à faible pas de temps**.

Il est évident que le type de modèle, son pas de temps et son mode de calage peuvent introduire un biais qu'il faudra s'efforcer de minimiser et qu'il faudra contrôler et connaître le mieux possible pour pouvoir interpréter ensuite ses résultats et mieux évaluer la portée des conclusions que l'on en tirera.

2.1.2.5 Interprétation des résultats et élaboration de synthèses régionales

L'interprétation des résultats pour en tirer des conclusions relatives aux régimes hydrologiques, constitue sans doute la partie la plus délicate des études sur petits bassins. Il convient en effet d'essayer de relier les comportements hydrologiques aux caractéristiques physicoclimatiques des bassins.

2 TOEBES et OURYVAEV (1970) recommande d'étudier de manière permanente un petit nombre de bassins choisis pour pouvoir servir de référence et permettre la correction et l'extension d'observations de courte durée.

Les deux types de données qu'il faut croiser et comparer sont de nature différente :

- Les résultats de l'**analyse hydrologique** doivent déjà être traités, critiqués, épurés. Leur mise en forme doit être conçue en fonction de l'interprétation que l'on compte faire. Ainsi, si l'on étudie les crues, les volumes écoulés doivent être calculés pour chaque événement pluie-écoulement; on calculera donc les temps de base, les débits de pointe et les autres caractéristiques des hydrogrammes. Si l'on étudie les écoulements de base, on s'efforcera de mettre en évidence les coefficients de tarissement, etc.
- Ce que l'on sait des **caractéristiques physiographiques** du bassin est beaucoup plus difficile à représenter d'une manière synthétique et avec fidélité. La description d'un simple profil pédologique fait déjà appel à un certain nombre de conventions, de codes et d'hypothèses simplificatrices. Quand on passe à la description d'une toposéquence, il y a une dimension ou un degré de liberté supplémentaire à intégrer et à décrire. Un bassin est constitué d'une infinité de toposéquences et nous n'avons pas parlé des variantes induites par la végétation et par l'action de l'homme, des animaux ou d'autres facteurs. La représentation de cette complexité infinie, par un petit nombre de paramètres numériques ou descriptifs simples est indispensable mais induit inévitablement une dégradation de l'information.

Les conclusions que l'on pourra retirer du croisement de ces deux types d'information dépendent donc de leur mise en forme et de leur aptitude à dépendre la réalité. La portée de ces conclusions dépend aussi d'**observations qualitatives effectuées sur le terrain**. C'est en observant la pluie ruisseler sur le sol qu'est apparue l'idée d'étudier les effets de surface; l'observation de certaines résurgences ou bien la présence de couches de sols non mouillées peut suggérer l'idée de cheminements préférentiels; de grands arbres toujours verts signalent la présence d'une nappe...

Ces conclusions dépendent enfin du **schéma de fonctionnement** ou de la **théorie que l'on essaye d'adapter aux faits de manière plus ou moins explicite**.

Le choix et l'application d'un schéma ou d'une théorie demandent beaucoup d'intuition et de sensibilité. Il faut savoir à partir de quand on ne peut plus négliger les différences inexplicables. Des générations d'hydrologues se sont, par exemple, obstinées à appliquer le schéma de ruissellement de HORTON et à calculer des coefficients de ruissellement globaux qui ne se comportaient pas tout à fait comme l'aurait voulu la théorie en fonction de l'intensité de la pluie. On a constaté récemment que la théorie des zones contributives s'adapte beaucoup mieux à toute une catégorie de bassins. Les faits sont têtus et finissent par engendrer de nouvelles théories, qui correspondent souvent à des sauts qualitatifs et aux progrès réels des connaissances.

La réunion des interprétations réalisées sur un ensemble de bassins conduit à présenter les résultats sous la forme d'une synthèse régionale. C'est le cas, par exemple, de la méthode d'évaluation des crues sur petits bassins proposée par RODIER et AUVRAY (1965) ou l'étude des états de surface des sols effectuée par CASENAVE et VALENTIN (1989). Ce sont des ouvrages qui peuvent être utilisés dans toute une région et qui répondent, par cela, aux demandes des aménageurs.

2.2 CONCEPTS ET SCHEMAS ACTUELS DE L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS : RESUME BIBLIOGRAPHIQUE

Avant d'aller plus loin, il nous faut effectuer un tour d'horizon, pour inventorier et évaluer la portée des publications et les travaux qui existent au Brésil et dans le monde. Nous nous limiterons aux travaux liés à la connaissance et à la gestion des ressources en eau dans les zones sèches, en évitant les ouvrages de base trop généraux comme VAN TE CHOW (1964) ou M. ROCHE (1963), etc. Quant à l'analyse des ouvrages qui traitent spécifiquement des crues elle sera effectuée au début du cinquième chapitre.

Nous avons regroupé notre analyse par thème :

■ Les aspects théoriques

De nombreux auteurs ont cherché à mieux comprendre les mécanismes qui favorisent ou contrarient l'écoulement en s'intéressant parfois aux problèmes de la planification soit de l'eau soit des réseaux de mesure. Certains, comme l'HOTE (1987), se sont intéressés, *culture oblige*, à l'aspect historique du cycle de l'eau. HEWLETT et NUTTER (1970) et MEROT (1988) ont proposé une nouvelle théorie qui suppose que le ruissellement provient surtout des bas des versants, qui sont rendus imperméables par la saturation en eau. Quand les fortes pluies s'accumulent, la taille de ces zones saturées augmente, ce qui explique l'accroissement du coefficient de ruissellement global du bassin. Cette théorie s'oppose à la conception Hortoniennne (HORTON, 1933) du ruissellement. Elle est adaptée aux modes de fonctionnement de nombreux bassins de zones humides et/ou qui présentent des bas-fonds importants. La zone de prédilection de ce schéma n'est pourtant pas le semi-aride. Il s'avère, en particulier, incapable d'expliquer correctement les "effets de surface" pour lesquels une dégradation de la surface du sol (décapage et colmatage de micropores) provoque son imperméabilisation et de très forts ruissellements.

D'autres auteurs comme IBIZA (1984a et b), et MORELL-SEYTOUX (1973a-1973b, 1974 et 1975), se sont intéressés aux modes d'infiltration ou aux fonctions de production, c'est à dire à la façon dont les précipitations se répartissent entre l'infiltration et le ruissellement.

GIRARD (1975), GIRARD *et al* (1972), IBIZA (1983), CORREIA et MOREL-SEYTOUX(1985), TUCCI (1987), DUNE (1983), LANNA et SCHWARZBACH (1989) et SERVAT (1986) se sont intéressés à la modélisation hydrologique, instrument d'analyse, maintenant incontournable.

La polémique et la provocation sont heureusement présentes dans ce domaine réputé austère. KLEMES (1986) analyse, par exemple, le rôle du dilettantisme en hydrologie...

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la technique d'étude de petits bassins, appelée étude de "bassins représentatifs". Signalons, tout d'abord, l'excellent guide édité par l'UNESCO (TOEBES et OURYVAEV,1970), et les travaux de planification effectués par l'ORSTOM, souvent dans les régions tropicales: DUBREUIL et GUISCAFRE (1971), DUBREUIL (1965), NOUVELOT (1974), CADIER et POURRUT (1979).

■ Connaissance du milieu physique des petits bassins

De nombreux auteurs se sont attachés à mieux connaître la physiographie des bassins en cherchant parfois à relier ces caractères physiques aux observations hydrologiques.

DUBREUIL *et al* (1972) ont tout d'abord calculé, rassemblé et homogénéisé les caractéristiques des très nombreux bassins étudiés par l'ORSTOM dans les zones tropicales. Ce recueil réunissait de manière synthétique les caractéristiques morphométriques et géologiques des bassins. On s'apercevra plus tard que l'information relative aux sols, à l'état de leur surface et à celui de la couverture végétale était insuffisante.

Plusieurs publications ont cherché à mieux cerner les paramètres explicatifs des régimes hydrologiques et à mieux définir les plus pertinents et leur mode de calcul (DUBREUIL 1966, 1967). L'étude des relations entre ces caractères physiques et les comportements hydrologiques a été, également, l'objet de nombreux travaux: DUBREUIL *et al* (1975), DUBREUIL et VUILLAUME (1975), DUBREUIL (1970, 1985, 1986) et RODIER et VUILLAUME (1980).

■ La végétation

La végétation est le premier élément du bassin que rencontre la pluie. Son rôle est complexe. Plusieurs auteurs se sont efforcés de le décrire et de l'analyser. La liste est longue. Citons, par exemple, BULTOT *et al* (1976), CAMUS *et al* (1976), FRANKEN *et al* (1982), GIRARD (1974), SOPPER et LYNCH (1970) et FRITSCH (1990).

■ Le sol

Le sol est rencontré par la pluie juste en dessous de la végétation et lui est intimement lié. Le type et la vigueur de la végétation dépendront de l'épaisseur et de la fertilité du sol; l'état de la surface du sol, l'intensité de l'érosion seront fonction de la protection offerte par la couverture végétale, de l'action des racines et de la faune associée.

On a démontré que, dans les zones semi-arides, le rôle de l'état de la surface du sol et de ses premiers décimètres était prépondérant.

Depuis WISCHMEIER et SMITH (1978), de nombreux auteurs se sont attachés à ce sujet; citons: CASENAVE et VALENTIN (1989), DUBREUIL (1967), LEPRUN (1984-85), THEBE et PONTANIER (1989), MOLINIER *et al* (1989a), BARRETO *et al* (1989), etc.

■ L'évaporation, l'évapotranspiration

L'évaporation est un phénomène qui modifie les réserves en eau du sol ou des barrages. A l'inverse du sol et de la végétation qui jouent un rôle d'"aiguilleur" des précipitations et dont les effets se font sentir dans de très courts délais, l'évaporation a une inertie ou un temps de réponse beaucoup plus long. On se contente souvent de moyennes journalières ou décennales de l'évaporation. La compréhension des mécanismes de l'évaporation requiert cependant une analyse selon un pas de temps beaucoup plus court, comme l'a montré

POUYAUD (1985). RIOU (1975) s'est efforcé de proposer une méthode d'évaluation pratique de l'évaporation, pour différentes zones climatiques africaines. BLANEY (1942) et TURC (1954-55) proposèrent des formules empiriques d'estimation de l'évaporation. MORTON (1983) étudia l'évaporation dans les retenues. Dans le Nordeste brésilien, HARGREAVES (1974, 1975) effectua le calcul de l'évaporation pour de nombreuses stations météorologiques brésiliennes dont les résultats furent réunis dans des recueils qui sont très utilisés par les projeteurs. GIRARD (1966) et MOLLE (1989a,b et 1991c) étudièrent l'évaporation des açudes, tandis que PASSERAT *et al* (1989) effectuaient des recherches sur l'influence de la végétation aquatique.

■ La transposition des résultats vers d'autres bassins

La transposition des résultats constitue l'un des principaux objectifs des études sur petits bassins. Les ouvrages sur ce sujet sont relativement rares.

RODIER (1982) s'efforça de *faire le point* sur ce problème. Cet auteur proposa également plusieurs méthodes pratiques pour transposer certaines des caractéristiques hydrologiques, (RODIER et AUVRAY 1965, RODIER 1976a et 1976b). Il publia également (RODIER, 1989) les résultats relatifs aux bassins perméables du Sahel, dont les modes de fonctionnement présentent de nombreuses analogies avec ceux que nous observons dans le Nordeste.

■ Publications destinées aux aménageurs

De nombreux ouvrages souvent moins ambitieux sur le plan théorique s'efforcent de présenter des solutions pratiques pour répondre aux problèmes rencontrés par les aménageurs.

Les auteurs américains publièrent les premiers ouvrages de référence dans ce domaine. Il faut, bien sûr, mentionner le DESIGN of SMALL DAMS dont la première édition remonte à 1960, BUREC (1987), et les manuels édités par le Soil Conservation Service, SCS (1975).

Plus près de nous, citons les excellents ouvrages consacrés à l'aménagement des bas-fonds africains (BERTON, 1988) et à la synthèse des résultats des petits bassins français publiés par le CEMAGREF (MICHEL, 1990).

DUBREUIL et CAMPELLO (1966) établirent des normes climatiques pour le Nordeste, CADIER *et al* (1989, 1990) et MOLLE (1991c) proposèrent des normes de dimensionnement de retenues.

■ Travaux spécifiques à l'hydrologie du Nordeste brésilien

Plusieurs travaux hydrologiques permettent d'accompagner l'évolution et les progrès des connaissances hydrologiques dans cette région ; AGUIAR (1940), tout d'abord, est le premier à proposer une méthode d'évaluation des ressources calée sur les données de la partie Nord du Sertão. Les estimations et les intuitions de cet auteur furent confirmées au cours des décennies suivantes. PIOGER (1964) dressa l'état des connaissances sur l'hydrologie des açudes du Nordeste. Les études de synthèse du GVI, (DUBREUIL *et al*, 1968) ont permis l'introduction de techniques hydrologiques modernes.

Mentionnons, ensuite, les ouvrages de base que constituent le PLIRHINE (BRASIL/SUDENE, 1980), les annuaires pluviométriques, les cartes hydrogéologiques, géologiques et topographiques éditées par la SUDENE et celles de sols élaborées par l'EMBRAPA.

Le DNAEE (1984) a élaboré une carte générale des disponibilités en eau du Brésil et le DNOCS de nombreux documents spécifiques, comme le plan directeur du rio PAJEU, DNOCS (1981). L'EMBRAPA a, elle aussi, élaboré plusieurs documents de référence EMBRAPA (1981).

Signalons enfin plusieurs travaux qui abordent plus profondément des sujets d'amplitude plus limitée :

CAMPELLO (1979) proposa une première synthèse des fonctionnements de petits bassins basés sur une modélisation systématique de leurs résultats.

LANNA (1983) aborde le problème de la régionalisation des études hydrologiques sur petits bassins.

VIEIRA *et al* (1983) décrivent l'information disponible à ce sujet, dans le Nordeste.

LARAQUE (1991) étudia le problème de l'évaluation de la salinisation dans les petits açudes.

Les équipes de la SUDENE et de l'ORSTOM publièrent une collection qui atteint maintenant trente titres, principalement consacrée aux résultats obtenus sur les bassins versants représentatifs. Citons les principales synthèses publiées dans cette collection : NOUVELOT *et al* (1979); CADIER et FREITAS (1983); CADIER *et al* (1983); LEPRUN *et al* (1983); LARAQUE (1989); MOLLE (1989b); HERBAUD *et al* (1989a); HERBAUD *et al* (1989b); CAVALCANTE *et al* (1990).

DUBREUIL et GIRARD (1970) et CADIER *et al* (1985, 1986) étudièrent l'influence de ces açudes sur les régimes hydrologiques.

MOLLE (1989b, 1991a et 1991b) étudia leur forme, les pertes par évaporation et infiltration et s'efforça d'en dresser un inventaire.

BORGES (1977) analysa le fonctionnement de 47 açudes de plus grande taille.

MOLINIER *et al* (1989) analysèrent l'hydrodynamique sur un versant du bassin de SUME, proposant une analyse et une quantification de plusieurs modes de fonctionnement nouveaux .

LEPRUN (1983, 1984 et 1986) fit le point sur les problèmes de conservation de sol et d'érosion dans cette région.

JACCON et SECHET (1980) décrivent l'introduction de techniques modernes de traitement de données qui ont permis la création d'une banque de données hydrométéorologiques.

HIEZ (1977, 1978) introduisit des techniques nouvelles d'homogénéisation et de critiques de données pluviométriques.

2.3 TECHNIQUES D'ETUDE UTILISEES DANS LE NORDESTE BRESILIEN

Les autorités brésiliennes décidèrent en 1973, sous l'impulsion de M. S. CAMPELLO, de lancer un plan d'étude de bassins représentatifs concernant toute la région Nordeste. Ce plan, très ambitieux, prévoyait l'étude de 22 ensembles de bassins représentatifs différents pendant une période de dix ans.

Pour réaliser ces études en phase de routine, il a fallu organiser le détail de toutes leurs étapes.

Il nous faut relater ce qui avait été prévu, en indiquant les motivations des choix faits et en analysant les causes des succès et des échecs. Le tableau 2.2 indique les principales étapes de ces études. Nous commençons, naturellement, par présenter celle de la planification qui est fondamentale, puisqu'elle oriente et définit toutes les autres études.

2.3.1 Planification initiale du réseau de bassins versants représentatifs

2.3.1.1 Planification effectuée par NOUVELOT en 1974

NOUVELOT a réalisé en 1974 une planification basée sur le concept de zones hydrologiques homogènes. Chacune de ces zones est obtenue en superposant les limites de classe d'un certain nombre "de facteurs conditionnels" des régimes hydrologiques.

NOUVELOT avait choisi quatre facteurs conditionnels définis de la façon suivante :

a) La précipitation annuelle H :

- H₁ : moins de 400 mm
- H₂ : entre 400 et 600 mm
- H₃ : entre 600 et 800 mm
- H₄ : entre 800 et 1.100 mm
- H₅ : entre 1.100 et 1.500 mm
- H₆ : supérieures à 1.500 mm.

Le suffixe + indique un régime pluviométrique complexe à deux saisons des pluies comme c'est le cas dans la partie méridionale du Nordeste. Son absence indique une seule saison des pluies.

b) La perméabilité du sous-sol P :

- P₁ : imperméable
- P₂ : perméabilité faible à moyenne
- P₃ : perméabilité moyenne à élevée
- P₄ : zone très perméable
- P₅ : zone Karstique.

TABLEAU 2.2 : Etapes des études hydrologiques de petits bassins

ETAPES	POINTS CRITIQUES
PLANIFICATION : Zonage et typologie de bassins Plan et chronogramme des études.	- Choix des critères de zonage (Précipitations, sols...) - Définition des paramètres hydrologiques à étudier : modules, Q _{max} , Salinité. - Trouver une technique de zonage et typologie régionale qui ne "lisse" pas trop les différences locales.
PROSPECTION : Choix du bassin. Détermination de ses caractères physiographiques.	- Représentativité - Accessibilité ; facilités logistiques.
IMPLANTATION DU RESEAU DE MESURE : - Réseau pluviométrique. - Réseau hydrométrique. Elaborer un rapport d'installation.	- Bonne couverture spatiale du réseau - Proximité d'observateurs compétents - Stabilité des lits des rivières. - Qualité hydraulique des écoulements : vitesses correctes, faibles débordements. - Positionnement du limnigraphe.
GESTION DU RESEAU DE MESURE : - Mesures de terrain. - Collecte, critique et traitement des données. - Elaborer les rapports de campagne annuels.	- Garantir les moyens de fonctionnement pendant plusieurs années. - Tournées sur le terrain de personnel compétent.
SYNTHESE FINALE POUR CHAQUE BASSIN : - Modélisation pluie x débit. - Confrontation des résultats hydrologiques avec les caractères physiographiques des bassins - Interprétation des résultats.	- Modélisation : Choix, calage, validation, extension de série. - Diminuer la subjectivité des simplifications nécessaires.
METHODE DE TRANSPOSITION REGIONALE	L'analyse multicritère est toujours délicate.

c) Le relief R utilise le concept de dénivelée spécifique (D_s) défini par DUBREUIL et GUISCAFRE (1971) :

$$D_s = D \times A^{-0.5} \times L \quad \text{où :}$$

- . D est la différence d'altitude exprimée en mètres qui sépare les courbes de niveau qui ont en dessous d'elles, respectivement, 5 % et 95 % de la surface du bassin.
- . A est la surface du bassin, en km².
- . L est la longueur du rectangle équivalent, en km.

Selon ces auteurs, D_s permet d'étendre les classes de relief établies pour une taille de bassin standard (25 km²) à des surfaces différentes. Il convient cependant de fixer des limites à l'éventail des surfaces. Dans leur travail, ces auteurs ont admis 7 et 500 km² comme bornes, pour des raisons liées à la précision des documents cartographiques disponibles.

R ₁ :	très faible	Ds < 10 m
R ₂ :	assez faible	10 m < Ds < 25 m
R ₃ :	faible	25 m < Ds < 50 m
R ₄ :	modéré	50 m < Ds < 100 m
R ₅ :	fort	100 m < Ds < 250 m
R ₆ :	assez fort	250 m < Ds < 500 m
R ₇ :	très fort	500 m < Ds mm.

d) **L'altitude du bassin A :**

A ₁ :	inférieure à 500 m
A ₂ :	comprise entre 500 et 800 m
A ₃ :	comprise entre 800 et 1.000 m
A ₄ :	supérieure à 1.000 m.

Le nombre théorique de combinaisons de ces classes est de 1.680. En stylisant certaines limites des facteurs conditionnels pour faciliter les superpositions, NOUVELOT obtient les 229 zones homogènes, déjà mentionnées et il aboutira donc au plan d'installation de 20 B.V.R. étalé sur cinq ans.

2.3.1.2 Pertinence du zonage et de la planification réalisée par NOUVELOT

Cette planification présente l'avantage d'identifier, de quantifier les principaux types de zones existantes dans le Nordeste et de présenter aux décideurs le programme de B.V.R. de manière claire et séduisante.

Cependant, à la lumière des résultats obtenus depuis lors, nous pouvons faire un certain nombre de critiques et de propositions d'amélioration de la technique utilisée par NOUVELOT, la planification restant, dans tous les cas une étape préalable et indispensable à toute étude systématique de BVR.

Outre le fait que certains bureaux d'études, trop pressés, aient carrément utilisé le zonage de NOUVELOT pour effectuer des transpositions de régimes qui n'avaient pas été prévues, nous savons que deux des quatre paramètres, le relief et la perméabilité du sous-sol, ne sont pas très pertinents pour la détermination des écoulements annuels dans les zones sèches :

- Pertinence du facteur relief :

S'il semble évident que ce facteur joue un rôle dans les temps caractéristiques des crues pour des raisons de transfert hydraulique dans les lits des rivières, nous n'avons pas pu mettre en évidence le rôle du relief sur les modules annuels ni à partir d'un échantillon des 72 parcelles expérimentales, ni à partir de celui des BVR, ni à partir de celui des bassins du réseau général, puisque l'on aboutit même, parfois, à des corrélations légèrement négatives entre l'écoulement et le relief, comme nous le montrons au chapitre 4. De plus, NOUVELOT a déterminé ses classes de relief avec des cartes au 1:1.000.000^{ème} en utilisant pour le calcul des classes de relief des bassins de taille généralement supérieure à 500 km². Ceci introduit un biais et attribue souvent un poids excessif aux parties accidentées du bassin, qui "entraînent" ainsi vers les classes R₄ à R₆ des grandes zones plates où le relief de la majorité des petits bassins élémentaires ne dépasse pas R₂ ou R₃.

- Pertinence du facteur sous-sol :

Dans les zones semi-arides, l'influence de la **végétation**, de l'état de la **surface du sol** et des **premiers décimètres du sol** sont déterminants dans la genèse des écoulements. Ceci n'est pas directement pris en compte par les classes de facteur perméabilité du sous-sol. Ces classes permettent, bien sûr, de séparer les deux grands modes de fonctionnement : cristallin et sédimentaire. Mais ce facteur ne permet pas de différencier un bassin dont le sous-sol granitique engendrera des arènes épaisses, qui ne produiront que peu d'écoulement, par rapport à un autre bassin sur schistes engendrant des sols argileux peu épais, qui ruisselleront facilement. Il aurait mieux valu effectuer le zonage des perméabilités à partir d'une carte de sols. Malheureusement ces dernières n'étaient que partiellement disponibles en 1973, ce qui explique les orientations prises par NOUVELOT. Quant à la végétation, les documents disponibles sont à trop petite échelle et ne sont souvent que le reflet des zones climatiques.

- Pertinence du facteur précipitations :

Les précipitations sont un facteur explicatif des écoulements qui a été heureusement mis en évidence dans toutes les tentatives de recherche de facteurs conditionnels présentées au chapitre 4. Le choix de ce facteur est donc **très pertinent**.

Les tentatives de zonage des écoulements mettent en évidence à l'intérieur du Nordeste semi-aride deux grandes zones climatiques³. A l'intérieur de chacune de ces zones, les écoulements s'ajustent à une loi exponentielle, mais ne dépendent pas de l'existence d'une ou deux saisons des pluies signalées par le signe + par NOUVELOT.

Nous recommanderions, aujourd'hui, après seize ans d'études, de prendre en compte la zone climatique en plus du total annuel considéré par NOUVELOT. Mais il était impossible de pressentir ces zones climatiques avec les éléments disponibles à l'époque.

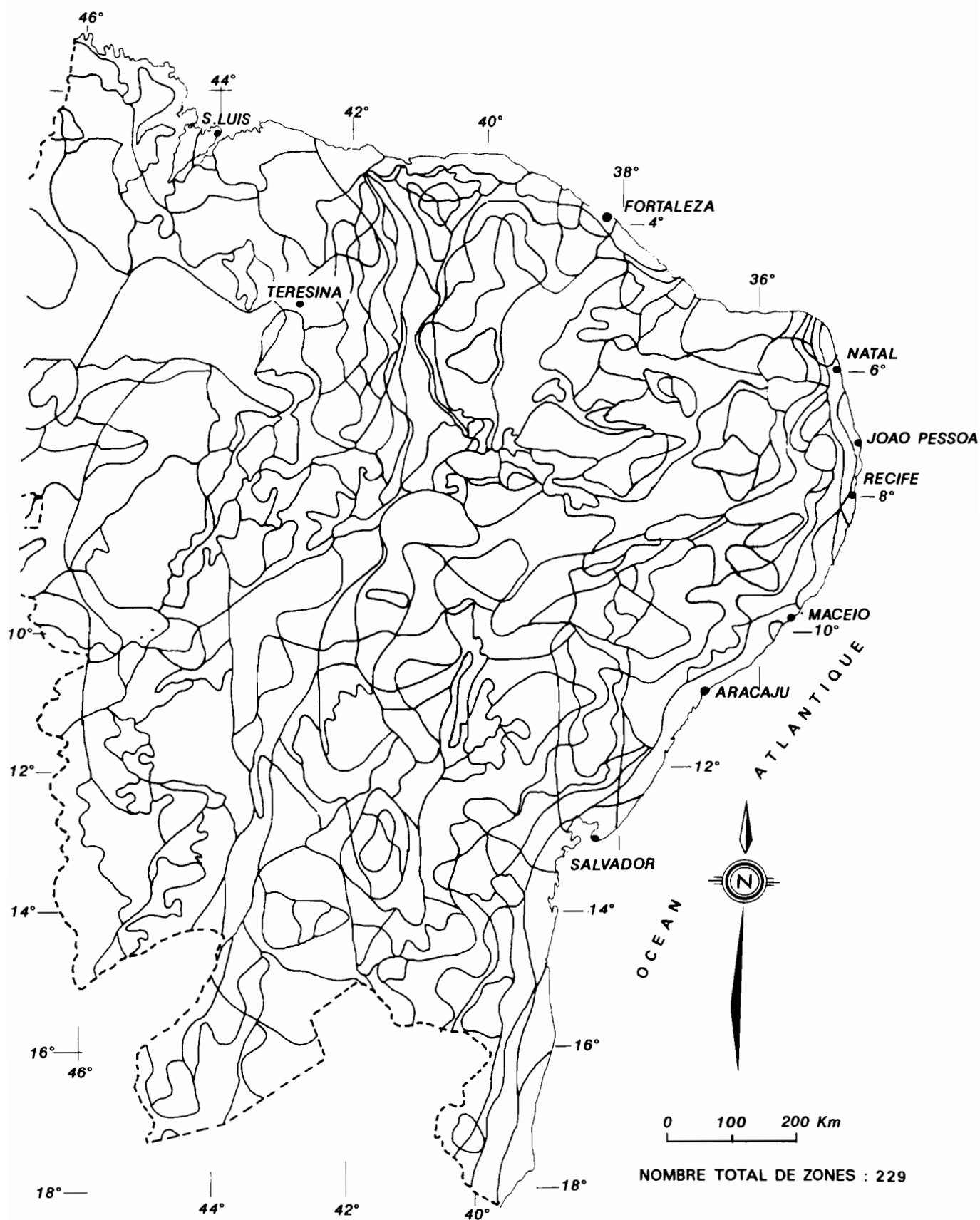
- Pertinence du facteur altitude :

Les classes d'altitude définies par NOUVELOT sont évidemment reliées à la température et à l'évaporation.

De plus, il est probable que certains microclimats d'altitude nettement moins ensoleillés et soumis à des brouillards fréquents sont souvent classés en A₄.

³ Ces zones climatiques sont délimitées en comparant les résultats d'un même modèle hydrologique qui utilise successivement comme entrée plusieurs pluviomètres différents. Le zonage climatique obtenu semble dépendre de la distribution des totaux en 24 h et d'autres caractéristiques géographiques comme l'éloignement à l'océan.

Figure 2.1 : Les zones hydrologiques homogènes du Nordeste brésilien (selon NOUVELOT)



2.3.1.3 Comment planifierions-nous aujourd'hui ?

Sans que l'on cherche à retirer le moindre mérite à NOUVELOT, qui a joué, en son temps, un rôle de précurseur et a su présenter dans de brefs délais une planification exhaustive, cohérente et séduisante, nous pouvons maintenant suggérer quelques recommandations qui pourraient être utilisées pour une mise à jour de ce travail de base.

Ces recommandations ont été suscitées d'une part par l'existence de documents nouveaux, qui n'existaient pas en 1973, comme les cartes pédologiques, les images radar ou satellite et le zonage synthétique de l'EMBRAPA et d'autre part par les connaissances acquises depuis lors sur les comportements des petits bassins, qui ont mis en évidence les facteurs conditionnels les plus importants.

Nous proposons deux ensembles de recommandations s'appuyant sur deux scénarios ou techniques d'approches différents. Nous ne commenterons et ne décrirons que ce qui concerne les zones semi-arides.

a) Premier scénario de zonage :

On conserve le principe de délimitation de zone homogène par superposition de "classes de facteurs conditionnels". Les facteurs à considérer devraient être, selon nous, les suivants :

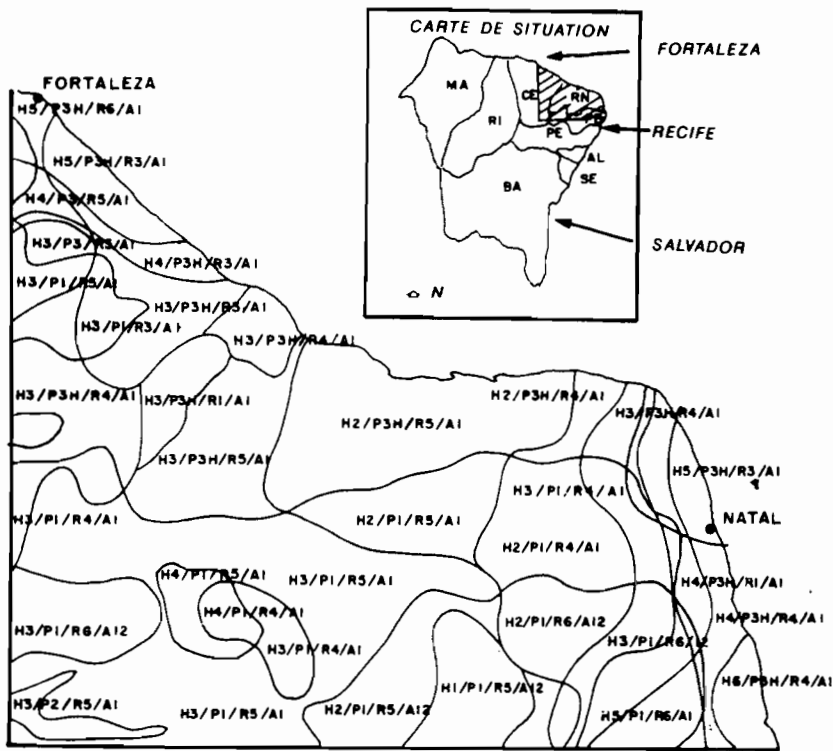
■ Deux facteurs fondamentaux :

- 1) Les précipitations ou la zone climatique (voir paragraphe précédent).
- 2) Le fonctionnement hydrodynamique des sols. A l'échelle de la planification, il n'est pas possible d'effectuer un zonage pédologique détaillé. Il faut se limiter à la délimitation de grandes zones dans lesquelles on rencontrera, dans des proportions variables, un certain nombre d'associations, de regroupements ou de familles de sols. Le zonage effectué en 1990 par l'EMBRAPA est un bon exemple de ce que nous proposons.

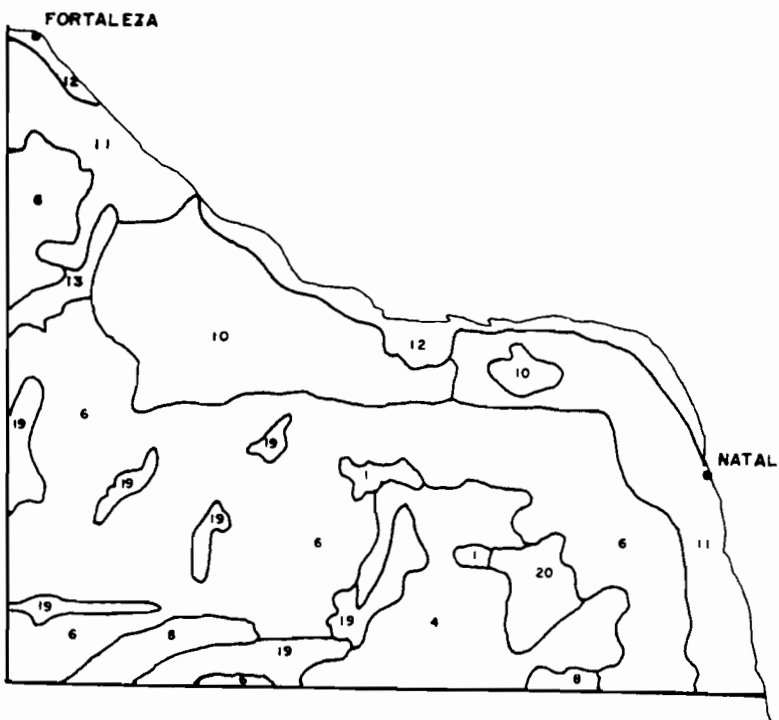
■ **Plusieurs facteurs d'appoint** permettant de différencier, si nécessaire, des sous-zones. Ces facteurs d'appoint ne doivent intervenir que dans le cas de différences régionales bien marquées. Nous pouvons proposer les facteurs suivants :

- **Etat de la végétation** et fréquence d'apparition de phénomènes de **dégradation de la surface des sols** (s'il existe des tendances régionales claires, mises en évidence par des cartes ou images).
- **Altitude**, qui est liée avec l'évapotranspiration.
- **Densité d'açudes**.
- Tout autre facteur qui apparaîtrait important dans une zone donnée (urbanisation...).

Figure 2.2. Comparaison de deux types de zonage



ZONES HYDROLOGIQUES HOMOGENES SELON NOUVELOT (1974)



ZONAGE DE L'EMBRAPA (1990)

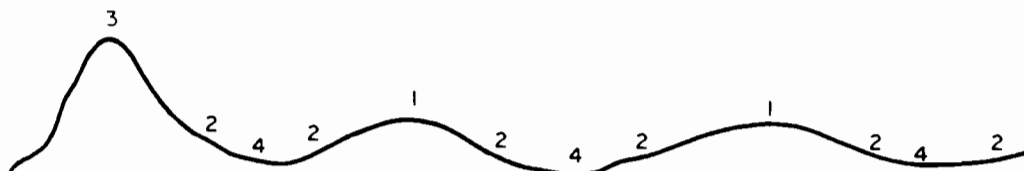
Puisqu'il est, de toutes les façons, impossible d'effectuer, à l'échelle d'une grande région, un zonage suffisamment détaillé pour délimiter tous les types de petits bassins existants, il faut s'efforcer de délimiter des zones de la **plus grande taille possible**, qui pourront contenir plusieurs types de petits bassins, que l'on identifiera.

Il faut utiliser le plus souvent possible les **images radar** qui mettent très clairement en évidence les zones de géomorphologie différentes et les **images satellites** qui peuvent faire de même avec les types d'occupation du sol et les açudes.

Le relief n'a pas été retenu comme facteur de zonage. Tout d'abord parce qu'il est déjà implicitement présent dans les cartes pédologiques utilisées pour la classification hydrodynamique des sols, ensuite parce que ce facteur semble souvent "masqué" par d'autres facteurs. Et enfin parce qu'il n'existe pratiquement pas, dans la partie du Nordeste étudié, de zone de relief extrêmement fort ou de zones très plates qui pourraient provoquer des pertes d'écoulement par endoréisme, comme cela arrive en Afrique. Ceci est dû à une tectonique plus active de cette partie du Brésil. S'il fallait utiliser le relief comme facteur de délimitation de zones, il faudrait recourir à des cartes géomorphologiques ou à des cartes de pente.

b) Deuxième scénario de zonage.

On essaye de s'appuyer sur un zonage plus global, dans lequel sont identifiées **de très grandes zones ou unités de paysage** qui peuvent chacune contenir plusieurs types de bassin parfois très différents. Ces types de bassin doivent correspondre à l'intérieur de chaque zone à des situations géologiques, pédologiques ou morphologiques bien définies et dont il faut décrire les toposéquences caractéristiques. A titre d'exemple nous présentons sur la figure 2.2 un extrait du travail effectué récemment par l'EMBRAPA (1991), que nous comparons à celui de NOUVELOT pour la même zone. Le nombre des zones a diminué, mais ce zonage a, paradoxalement, gagné en précision puisqu'il n'est plus soumis aux ajustements rendus nécessaires par la superposition des limites des différents paramètres. La figure 2.3 montre une séquence caractéristique de sols que l'on rencontre dans la plus grande des zones identifiées par l'EMBRAPA appelée dépression SERTANEJA qui couvrent près de 370.000 km², soit environ 40 % de la zone semi-aride.



Unité de paysage : DEPRESSION SERTANEJA

Figure 2.3. Séquence de sol fréquente dans une unité de paysage de l'EMBRAPA

Selon l'EMBRAPA, les sols les plus fréquents dans quatre situations caractéristiques des parties de la "Dépression Sertaneja" dont le relief est moyen à assez fort sont les suivants :

Situation 1 - Partie haute :

BRUNS NON CALCIFIQUES : sols sur zones planes à ondulées, de drainage moyen, de texture moyenne à argileuse, caillouteux et de fertilité naturelle élevée.

Situation 2 - Partie basse des versants :

PLANOSOLS : sols peu profonds, mal drainés, de texture argileuse et moyenne argileuse et de fertilité naturelle moyenne présentant des problèmes de salinisation.

BRUNS NON CALCIFIQUES VERTIQUES : sols peu profonds, mal drainés, de texture moyenne à argileuse et de fertilité naturelle élevée.

Situation 3 - Filon de quartz résiduel (qui forme souvent une crête) :

SOLS LITHOSOLIQUES : sols de texture argileuse à moyenne, caillouteux et de fertilité naturelle moyenne.

Situation 4 - Fonds de vallées

SOLS ALLUVIAUX : sols profonds, moyennement drainés, de texture très variable et de fertilité naturelle moyenne à élevée.

On constate, en parcourant de grandes distances dans le Nordeste, que l'enchaînement ou la séquence de sols, décrites par l'EMBRAPA, se répète très fréquemment. Les bassins qui leurs sont associés devraient, en toute logique, présenter une certaine similitude.

2.3.2 Installation d'un bassin versant représentatif

Il n'est pas dans notre intention d'élaborer ici un "petit manuel d'hydrométrie" mais de faire part de notre expérience en signalant et expliquant les principaux points délicats que l'on rencontre sur le terrain et dans le traitement des données.

Les principales étapes de la "vie" d'un bassin versant représentatif (sélection, installation, gestion, traitement des données, interprétation et synthèse) suivent des règles et des normes qui ont été décrites par CAMPELLO *et al* (1983). Résumons ces principales étapes, en profitant du recul qui permet de mieux percevoir les principaux aspects positifs et points forts de ce programme, mais aussi ses faiblesses et ce qu'il aurait fallu faire pour y remédier.

■ **Choix du bassin :**

Le choix du bassin s'effectue, bien sûr, en fonction de la planification présentée précédemment.

La définition du site exact du bassin à l'intérieur de la zone ou région choisie s'effectue suivant deux types de critères :

- **Des critères hydrologiques et physiographiques :**

Ces critères garantissent que le bassin choisi représente bien le type de bassin que l'on veut étudier. Il faut, en particulier, éviter les bassins hétérogènes, à cheval sur deux zones, dont les fonctionnements hydrologiques peuvent être extrêmement complexes, ce qui compliquera ou rendra impossible l'analyse et l'interprétation des observations. Ceci conduira souvent au **choix de bassins assez petits** et à proposer l'étude de sous-bassins ou parcelles, choisis pour éclairer les principaux types de fonctionnement prévisibles. Ainsi la surface totale du dernier B.V.R. installé à ANGELIM est de l'ordre de 10 km² alors que le B.V.R. du RIACHO DO NAVIO installé en 1970 contrôlait une surface de près de 500 km².

- **Des critères qui faciliteront la logistique de la gestion du bassin :**

- . Une bonne accessibilité en toute saison au bassin et à toutes les stations est fondamentale. La présence d'une route goudronnée ou carrossable proche ou traversant le bassin est un atout majeur : elle facilitera, bien sûr, la prospection initiale et sera ensuite le garant de l'accès des hydrologues et de leur matériel aux stations limnigraphiques, en particulier en période de crue .
- . Le choix est aussi souvent effectué en fonction des conditions imposées par les organismes bailleurs de fonds : il faudra implanter le bassin dans tel Etat, dans telle zone ou encore à proximité d'une station expérimentale agronomique.
- . Enfin le succès final de l'entreprise dépendra souvent des facilités logistiques et d'intendance locales : possibilité de se loger, d'acheter de la nourriture, de stocker du matériel, existence de propriétaires ou "fazendeiros" autorisant la traversée de leurs terres et permettant l'installation de stations hydrométriques et de pluviomètres. La présence d'un habitat rural dispersé facilitera la recherche des observateurs du réseau pluviométrique.



**CE QU'IL FAUT FAIRE ET
CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE**



BONNE STATION HYDROMETRIQUE



CE QU'IL FAUT EVITER:

- ① Station non stabilisée
- ② Passerelle difficile d'accès en hautes eaux et qui ne mesure pas tout l'écoulement
- ③ l'érosion



■ **Installation du réseau de mesure :**

L'accessibilité et la proximité des lieux d'habitation des observateurs sont deux conditions déterminantes dans le choix des sites des différents appareils.

a) Réseau pluviométrique, pluviographique et météorologique :

Les densités minimales recommandées pour le réseau pluviométrique sont les suivantes :

- 1 pluviomètre pour 2 km² pour des bassins dont la surface est de l'ordre de 10 km².
- 1 pluviomètre pour 4 ou 5 km² pour des bassins dont la surface est de l'ordre de 100 km².

La densité du réseau pluviographique est cinq à dix fois plus faible.

On installe une station météorologique, le plus souvent dans la partie centrale du bassin, près de la base des hydrologues.

Il faut situer avec précision tous ces appareils sur les cartes et les photographies aériennes et s'assurer que leur répartition géographique couvre de la manière la plus homogène possible les différentes parties du bassin.

Au moment de l'installation de l'appareil, il faut remplir un formulaire de procès verbal d'installation de l'appareil. Les formulaires utilisés par la SUDENE sont un bon exemple de ce qu'il faut faire. Ils sont très complets, rendent compte du site et des routes d'accès à l'appareil, fournissent des informations sur l'observateur et le type d'appareil. Une seule critique : ces protocoles, établis au début des années soixante, lors de l'énorme effort d'expansion du réseau général de mesure du Nordeste, n'imposent pas des photographies de l'appareil et de son site.

b) Réseau de mesure hydrométrique :

Les stations du réseau hydrométrique doivent, comme les autres appareils, être repérées avec précision sur les cartes et photos, faire l'objet d'un procès-verbal d'installation, être accessibles et proches du lieu d'habitation de leur observateur. Un soin particulier doit être apporté au repérage des bornes topographiques . Des plans et des photos de toutes les installations doivent être réalisées.

Le choix du site exact d'une station limnigraphique est très important et conditionnera la qualité des mesures des écoulements. Il doit répondre aux critères hydrauliques suivants :

b.1 Stabilité du lit :

C'est la qualité essentielle pour la suite des opérations, puisqu'elle évitera le ré-étalonnage de la station après chaque crue, qui est pratiquement impossible de réaliser.

C'est aussi peut-être la condition la plus difficile à réaliser dans ces régions de cours d'eau intermittents à fonds sableux et souvent soumis à une érosion et à un transport de sédiments actifs. Quand on n'arrive pas à installer la station en amont d'une section de contrôle hydraulique indiscutable (barre rocheuse, cascade, buse ou radier permettant le passage d'une route), il faudra construire une section de contrôle artificielle. On recommande pour cela la construction d'un radier ou semelle en béton de quelque mètres de largeur, surélevée d'une hauteur H par rapport au profil naturel du lit. Le choix de cette hauteur H de surélévation est délicat: si H est trop faible, on risque l'ensablement de l'ensemble du dispositif qui supprimera la stabilité recherchée ; si H est trop fort on créera une sorte de petit barrage avec des phénomènes de mise en vitesse de l'écoulement pouvant induire en hautes eaux des différences de niveaux entre la section de mesure des vitesses (moulinet) et des hauteurs d'eau (limnigraphes). De plus, des fortes valeurs de H pourront provoquer des problèmes d'affouillement en aval du radier, ou imposeront une construction plus robuste. En général on choisit une valeur de H entre 20 et 50 cm.

Le profil transversal du radier est soit horizontal, soit en forme de V très ouvert.

Pour les plus petits bassins, on conseille l'installation d'un déversoir triangulaire ou d'un seuil jaugeur de type PARSHALL.

L'ensablement de ces appareils, des sections de mesure et des prises d'eau et canaux d'accès aux limnigraphes pose pratiquement toujours problème.

b.2 Qualité hydraulique de l'écoulement :

La qualité des jaugeages dépendra du comportement hydraulique de la rivière dans la section de jaugeage.

Les vitesses devront être réparties de la manière la plus uniforme possible et arriver perpendiculairement dans toute la section de mesure.

Il faut choisir un bief rectiligne ou construire des dispositifs (murs, etc.) de canalisation du flux de l'eau. Attention, ces dispositifs pourront parfois induire des turbulences, remous et contre-courants qu'il faut à tout prix éviter.

Il faut également éviter, si possible, que les vitesses dépassent 2 m/s, lors des plus fortes crues. L'estimation de ces vitesses maximum doit être faite à l'aide d'une formule d'hydraulique comme celle de CHEZY dans laquelle interviennent la pente de la ligne d'eau, la profondeur ou le rayon hydraulique de la rivière. Ces données sont obtenues par des mesures topographiques. Il faut d'autre part éviter que la vitesse de l'eau soit inférieure à 10 cm/s, pour des problèmes de sensibilité et de vitesse de démarrage de moulinet.

Le mode de jaugeage (à gué, à partir d'une passerelle, d'un téléphérique, d'une embarcation, ou chimique) sera choisi en fonction de la profondeur, de la largeur et de la vitesse prévues. Il faut privilégier, dans la mesure du possible, les mesures au moulinet réalisées à gué ou à partir d'une passerelle.

b.3 Débordements :

Il faut, dans la mesure du possible, choisir une section pour laquelle les débordements des plus fortes crues sont nuls ou faibles. Construire, si nécessaire, des **digues de contention des débordements**. Ces digues devront être conçues pour n'avoir qu'une faible probabilité d'être emportées par une crue. Si elles sont en terre et ne peuvent pas résister à un débordement, les construire assez hautes ou prévoir une sorte de zone "fusible" destinée à être emportée (et reconstruite) en cas de très forte crue.

Les digues peuvent provoquer des perturbations hydrauliques indésirables (remous, etc.). Il faut toujours effectuer un relevé topographique avant leur construction.

La recherche d'un site sans débordement est difficilement conciliable avec celles d'un site où les vitesses ne dépassant pas 2 m/s.

b.4 Autres recommandations :

Quelques autres mesures faciliteront le fonctionnement de la station :

- Protection du limnigraphe, qui devra être situé bien au dessus du niveau des plus hautes eaux, qui ne devra pas être dans une zone de fortes vitesses et être protégé contre les chocs des objets flottants emportés par les crues (troncs d'arbres, etc.).
- Faire des marques de peinture très lisibles sur les passerelles et les câbles à des distances régulières pour faciliter les repérages lors des jaugeages; prévoir des dispositifs fixes ou semi-fixes d'éclairage pour les jaugeages de nuit ; installer des échelles limnimétriques lisibles depuis la passerelle de mesure. Il faudra toujours que la distance entre les sections de mesure de vitesses (passerelle) et des niveaux (échelles et limnigraphes) soit la plus faible possible. Prévoir une trappe d'accès facile à l'intérieur du tube du limnigraphe et concevoir le canal de communication avec la rivière de telle façon que l'on puisse facilement le curer et s'assurer de son bon fonctionnement.
- Prévoir un abri ou un petit refuge qui rende plus supportables les longues attentes des crues. Il faut prévoir des rambardes sur la passerelle et penser à la sécurité des hydrométristes dans le cas où l'un des açudes situés en amont viendrait à être emporté et provoquerait un crue très brutale.

La conciliation de tous ces critères est souvent difficile à réaliser. Le choix du site sera finalement un compromis qui nécessitera du doigté et de l'expérience.

Un **rapport d'installation** doit être élaboré pour rendre compte et réunir les principales caractéristiques du dispositif installé. Ce rapport suit un plan type ou canevas précis ; il est souvent joint au premier rapport de campagne. Le rapport d'installation et de la première campagne du B.V.R. d'AÇU élaboré par ZELAQUETT (1980) en constitue un bon exemple.

2.3.3 Gestion en routine des bassins versants.

La gestion d'un BVR doit permettre d'obtenir le maximum d'informations sur son fonctionnement hydrologique en termes de qualité et de quantité. Pour cela trois conditions sont nécessaires :

- L'installation correcte des instruments dont nous avons parlé au point précédent.
- L'intervention de techniciens compétents pour les mesures de terrain, le traitement et l'analyse des données.
- Des moyens de fonctionnement et une souplesse suffisants pour assurer toutes ces tâches et en particulier les mesures de terrain et l'élaboration des rapports.

La gestion en phase de routine des BVR installés par la SUDENE s'est effectuée dans les conditions et selon les normes suivantes :

a) Moyens en personnel :

Ils ont été suffisants jusqu'en 1985, un ingénieur supervisant les travaux de chaque BVR qui étaient confiés à une équipe de 2 à 3 techniciens correctement formés et compétents.

b) Travaux de terrain :

Les normes prévoyaient la présence permanente d'un ou deux techniciens sur chaque bassin durant la saison des pluies qui dure, le plus souvent, cinq mois et la réalisation d'une tournée par mois le reste de l'année, le tout étant supervisé par l'ingénieur responsable. Un local était loué ou construit pour faciliter les travaux de terrain. Les observateurs étaient choisis parmi les habitants en installant si possible les appareils près de leurs demeures. La mise à contribution d'un nombre réduit d'observateurs effectuant chaque jour la "tournée" de plusieurs appareils n'a été que rarement retenue.

Outre la phase d'installation déjà citée, les principaux travaux de terrain sont les suivants :

- Formation et contrôle des observateurs, maintenance des enregistreurs, collecte des bulletins de lecture, des enregistrements et réalisation d'une critique préliminaire des données recueillies.
- Réalisation des jaugeages nécessaires à l'étalonnage des stations.
- Travaux spécifiques, non répétitifs : relevés topographiques ou bathymétriques d'açudes, de bassins, réalisation de tests d'infiltration, etc.

Chaque fois que cela est possible, on utilise les normes⁴ déjà établies par la SUDENE pour son réseau général de mesure hydropluviométrique.

4 Ces normes, très complètes, doivent parfois être modifiées. Ainsi, par exemple, les normes de calcul des débits sont les suivantes :

- séparation sur le limnigramme de périodes présentant une variation limnimétrique maximum de $\Delta H = 10$ cm ;
- calcul pour chacune de ces périodes de la cote moyenne ;
- le débit moyen de la période est celui qui correspond à cette cote moyenne.

c) Traitement des données ; élaboration des rapports de campagne :

Les données ont été traitées de la façon suivante :

- **Information pluviométrique** : saisie, traitement et stockage par le système informatique BAC de la banque de donnée de la SUDENE. Pour un bassin donné, ce système BAC est conçu⁵ pour traiter d'un bloc toutes les données pluviométriques de chaque année.
- **Information pluviographique** : traitement direct par le système de pluviographie PLG de la banque de donnée de la SUDENE. La comparaison entre l'information pluviométrique et pluviographique est effectuée au moment de la saisie du pluviogramme.
- **Calcul de jaugeages et traitement des limnigrammes** : ces traitements sont entièrement manuels. Ils utilisent des barèmes et le planimétrage de dessins sur papier millimétré. Le système informatique, implanté dans les années 1970 pour les stations du réseau général, est trop lourd et peu adapté aux rivières intermittentes, sujettes à de nombreux détarages, qui rendent nécessaires de nombreuses retouches itératives⁶.

Après chaque campagne, il faut publier un **rapport de campagne** qui présente les résultats en suivant un canevas précis.

Outre la présentation des résultats, ce rapport de campagne est le garant du bon déroulement des mesures. Il permet de vérifier que l'on a bien rassemblé toutes les données et réoriente, si nécessaire, les mesures de terrain de la campagne suivante. Enfin il prépare la synthèse finale à laquelle il doit servir de base.

2.3.4 Fonctionnement du dispositif et résultats obtenus

La masse des données recueillies sur l'ensemble du dispositif est considérable et a permis d'améliorer sensiblement les connaissances. En 1990, 4.084 stations x années d'observation hydropluviométriques avaient été traitées et 27 rapports hydrologiques publiés, totalisant près de 3.000 pages.

L'acquisition de ces données fut parfois difficile. Pour éviter dans le futur la répétition de certaines erreurs, signalons les principaux problèmes rencontrés.

La cause première et circonstance toujours aggravante de tous les problèmes techniques énumérés plus bas est, sans aucun doute, **le nombre trop faible de tournées réalisées sur le terrain par les techniciens**⁷. Outre

Cette norme suppose implicitement que le limnigramme et la courbe d'étalonnage sont linéaires par rapport au temps et à la hauteur, dans l'intervalle ΔH . Elle est évidemment adaptée aux grands fleuves et doit être modifiée pour les petits bassins. Il suffit, pour cela, de prendre $\Delta H = 1$ cm pour le début des courbes d'étalonnage et $\Delta H = 3$ ou 5 cm pour les hautes eaux.

5 Le gros système PLV de la banque de données, emmagasine séquentiellement toutes les années d'un même pluviomètre avant de passer au suivant. Il est peu adapté au traitement simultané de la même année de plusieurs pluviomètres, permis par le système BAC décrit par PUNGS et CADIER (1985).

6 En 1980, l'utilisation du système HID de la banque de données de la SUDENE nécessitait au moins 24 heures d'attente. Les graphiques nécessaires au contrôle ne pouvaient être émis que sur un autre ordinateur. Actuellement, des logiciels de traitement comme HYDROM, fonctionnent sur micro-ordinateur et sont beaucoup mieux adaptés aux petits bassins. Ils sont utilisés, par la SUDENE, depuis 1989.

7 Souvent déjà trop faible avant 1985, le rythme des tournées est devenu après cette date totalement insuffisant, exception faite de l'année 1989.

la désorganisation de certaines campagnes de mesures, cette carence a empêché d'assurer le fonctionnement normal et continu des enregistreurs et d'assurer un suivi des observateurs.

Les appareils de mesure :

Les problèmes les plus fréquents causés par les appareils et instruments sont les suivants :

- **Pluviomètres** : Les pluviomètres, fabriqués par la marque brésilienne IH, sont du type "Ville de Paris". Ils sont relativement sophistiqués, chers, posent des problèmes d'étanchéité et nécessitent une maintenance régulière: leur forme est compliquée : ils sont composés de plusieurs troncs de cône et donc de plusieurs soudures qui lâchent parfois. Un robinet situé au bas de l'appareil permet de le vidanger. Une petite bille de caoutchouc assure son étanchéité. Elle peut se dessécher ou se déformer et doit donc être changée régulièrement, pour éviter les fuites.
- **Pluviographes** : pratiquement tous les pluviographes sont à siphon, toujours de la marque IH. Robustes, ils fonctionnent bien. Les siphons se bouchent parfois. Quand, comme cela a été trop souvent le cas, on veut ré-utiliser plusieurs fois le même diagramme, on obtient parfois un pluviogramme indéchiffrable et plein d'ambiguïtés.
- **Stations météorologiques** : mis à part les petits animaux, grenouilles et oiseaux qui viennent s'ébattre et s'abreuver dans les bacs d'évaporation, quelques bris de thermomètre et autres abeilles venant nicher dans les abris météo, ces stations fournissent en général de bons résultats.
- **Echelles limnimétriques** : le chiffre correspondant aux mètres de l'élément d'échelle suivant est peint sur la partie supérieure du support de chaque échelle. Ceci a occasionné, plusieurs fois, des erreurs de lecture d'un ou de plusieurs mètres entiers. Ces erreurs peuvent être lourdes de conséquences, si elles ne sont pas détectées.

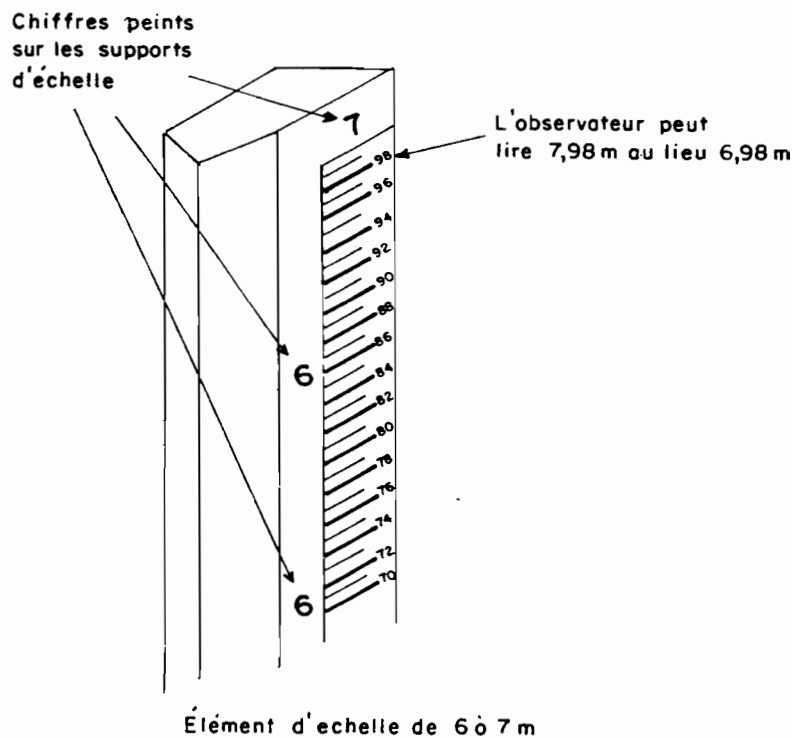


Fig. 2.4 : Erreur de lecture limnimétrique fréquente.

- **Limnigraphes** : fabriqués par IH, ils possèdent une platine d'enregistrement qui entraîne un rouleau de papier. Les mouvements du flotteur sont transmis par une rampe hélicoïdale à retournement. Ils sont robustes et sûrs. Souvent le manque de papier conduit à le réutiliser plusieurs fois après ré-embobinage.

L'augmentation d'humidité agissant sur des papiers déjà froissés (et pas toujours imprimés par le constructeur) conduit trop souvent à des bourrages ou à des arrêts intempestifs. Un autre problème souvent constaté résulte de l'impossibilité de connaître la cote exacte du décalage du flotteur par rapport au zéro de l'échelle au début d'une crue, puisqu'il repose sur un fond sableux mobile. Les tuyaux de communication installés entre les limnigraphes et le cours d'eau se sont souvent bouchés sur les premiers bassins. Ils ont été supprimés ensuite.

- **Instruments de jaugeage** : fabriqués par la marque OTT, les moulinets et les compteurs sont robustes mais très vétustes. Les compteurs posent souvent problème.

Les observateurs, la gestion du réseau et le traitement des données :

Le paiement et le contrôle des observateurs s'effectuent de manière très irrégulière depuis 1985.

Les difficultés d'accès font que certaines stations ne sont inspectées qu'une fois par an.

Une critique rudimentaire des données pluviométriques est faite sur le bassin.

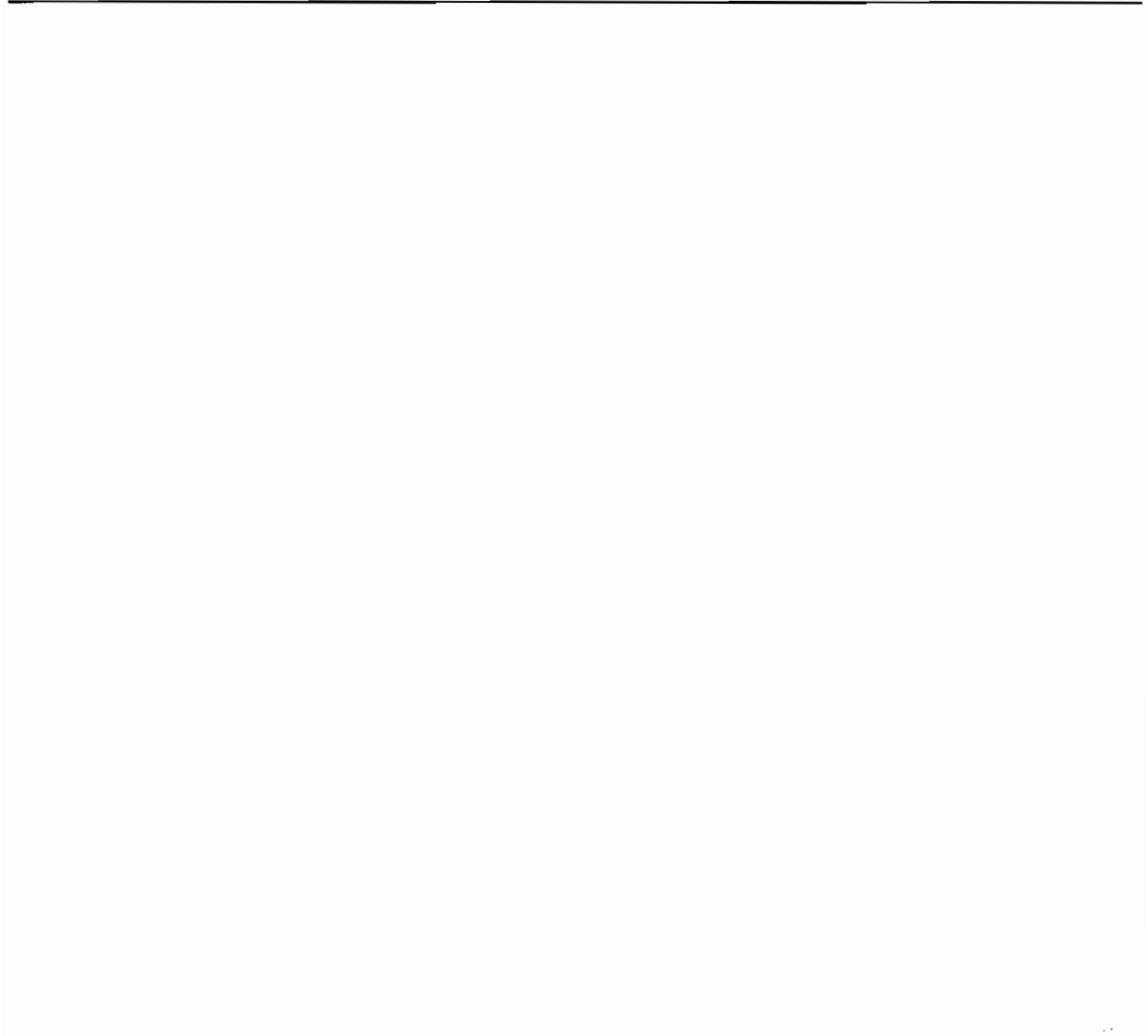
Jusqu'en 1984 les données recueillies sur les bassins étaient, en principe, traitées dans un délai maximum de six mois, ce qui permettait de réorienter, si nécessaire, les mesures de la campagne suivante. A cette époque, un délai moyen d'élaboration d'un rapport de campagne était de un à deux ans, comme le montre le tableau 2.3

Ce tableau montre l'absence de publication entre 1985 et 1988, provoqué par le démantèlement des équipes et l'arrêt quasi-total du traitement des données durant cette période.

La baisse de qualité des données des BVR de cette période est compensée par le début du fonctionnement des bassins expérimentaux qui fournissent des données de meilleure qualité.

Tableau 2.3 : Dates de publication des différents rapports

Bassin	Rapport	Année de publication	Bassin	Rapport	Année de publication
TAUä :	Installation 1977	1977	IBIPEBA :	Campagne 1977	1978
	Campagne 1978-79	1980		Campagne 1978	1980
	Campagne 1980	1981		Campagne 1979	1982
	Campagne 1982	1984		Campagne 1980	1982
	Rapport final 1977-89	1990		Campagne 1981	1984
	Rapport final 1977-82	1989*			
SUME	Campagnes 1973-80	1983	ASSU	Campagnes 1978 à 80	1981
	Bass.Experimental 1982	1983		Campagnes 1981 à 89	(à faire)
	ATP 1986-88	1988		Rapport final	(à faire)
	Campagnes 1981-90	(à faire)			
	Rapport final	(à faire)			
RIACHO	Campagnes 1971-76	1977	ESCADA	Campagne 1975	1976
DO NAVIO	Rapport final 1971-77	1979		Campagne 1976	1977
				Campagne 1977	1979
				Rapport final	(à faire)
JUATAMA : Rapport final					
	1964-63 et 1976-77	1990			



TROISIEME PARTIE

3. DESCRIPTION DES BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS DU NORDESTE BRESILIEN

Nous avons réuni, dans ce chapitre, les éléments essentiels, nécessaires à la compréhension des études entreprises sur chaque ensemble de bassins, de leurs buts et de leurs résultats.

Nous avons adopté, pour chaque bassin, le schéma de présentation suivant :

- Historique des études, inventaire des données et des publications.
- Description du bassin, de sa région, en insistant sur les sols et la végétation.
- Equipements et information recueillie.
- Interprétation. Nouvelles connaissances hydrologiques apportées par le bassin.

La carte de la figure 1.12, dans le premier chapitre, permet de situer tous les bassins.

Les trois bassins les plus importants (TAUA, SUME et RIACHO DO NAVIO) sont apparemment très proches les uns des autres puisqu'ils sont situés sur socle cristallin dépourvu d'aquifère, avec des totaux pluviométriques comparables, de l'ordre de 550 mm. Nous verrons cependant qu'il existe des différences considérables et que chacun de ces bassins apporte des informations bien différentes.

JUATAMA est situé sur le socle cristallin, dans une zone accidentée, avec des inselbergs, dont la pluviométrie moyenne dépasse 800 mm. Il ne possède qu'une seule station hydrométrique. La taille de ce bassin est relativement petite.

IBIPEBA apporte des informations sur les bassins sédimentaires de régions situées nettement plus au sud, recouvertes de plateaux calcaires parfois karstiques, en présence de quartzites.

Nous avons regroupé, en annexe, quelques informations relatives à l'ensemble de petits bassins qui avaient été étudiés, dans les années soixante, par le programme du Val du JAGUARIBE (ou GVJ), à trois açudes dont le suivi a été assuré par le récent programme "Açude" et à 72 parcelles d'érosion situées dans le semi-aride.

Le nombre de bassins et sous-bassins, dont la qualité des données a été, finalement, jugée suffisante pour caler des modèles de simulation pluie débit, s'élève à 42. Ces bassins constituent, actuellement, la principale source d'information sur les régimes hydrologiques de cette région.

3.1 LE BASSIN REPRESENTATIF DE TAUVA

Le nombre et la diversité des sous-bassins étudiés, alliés à la longueur et à l'homogénéité des périodes de mesures, rendent absolument fondamentale la contribution du bassin de TAUVA aux connaissances hydrologiques actuelles du Nordeste.

3.1.1 Historique

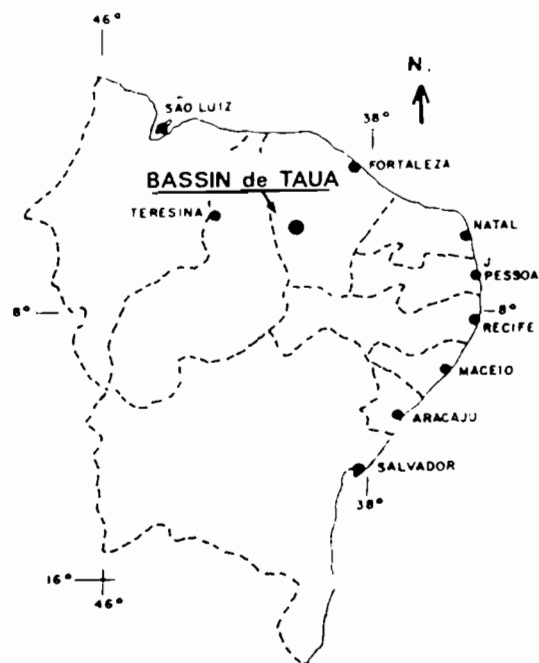
Le suivi hydrologique du Bassin Versant Représentatif de TAUVA a commencé à la fin de l'année 1977, dans une des zones les plus deshéritées du Nordeste, le Sertão des INHAMHUNS, situé à plus de 1.000 km de Recife, dans le Sud Ouest de l'Etat du Ceará, à 300 km au sud de FORTALEZA. Les précipitations sur ce bassin de 194 km² sont faibles. Le sous-sol cristallin et la très faible importance des zones alluviales interdisent de penser sérieusement à l'utilisation des eaux souterraines.

Le projet initial, ambitieux et multidisciplinaire, alliait plusieurs organismes dont la SUDENE, l'Université Fédérale du Ceará (UFCE) et l'ORSTOM. Il visait l'étude intégrée de l'écosystème de cette région et comportait un volet botanique important. En réalité, seul le dispositif de mesure hydrologique fut installé par la SUDENE, avec le conseil de l'ORSTOM. Ce dispositif de terrain, important, totalise plus de 80 appareils de mesure. Il permet le contrôle de 23 bassins et parcelles différents, dont la plupart étaient encore observés en 1990. La surface moyenne couverte par chaque pluviomètre est de 3,5 km².

Ces installations se sont réalisées en trois phases successives :

- Fin 1977 : installation du réseau pluviométrique, pluviographique et deux stations hydrométriques contrôlant l'ensemble du bassin (194 km²) et le sous-bassin de MUNDO NOVO (19 km²).
- Fin 1980 : installation de la station hydrométrique de CALDEIRAO (0,77 km²) et début du suivi hydrométrique intensif et systématique de 11 açudes.
- Fin 1985 : Dans le cadre d'un projet financé par le CNPq, installation par l'UFCE et la SUDENE d'un ensemble de 4 micro-bassins de l'ordre d'un ha et de 5 parcelles de 100 m². Ceux-ci sont situés à l'intérieur du bassin de CALDEIRAO, cité précédemment, et cherchent à en représenter les principaux types d'association sol-végétation.

Ce bassin a fait l'objet de 4 rapports de campagne (NOUVELOT et PEREIRA, 1977 ; GALINDO, 1980 ; LINS, 1981 ; LINS, 1984), d'un rapport de synthèse final (CAVALCANTE *et al*, 1990) d'où nous avons retiré la plus grande partie des informations que nous présentons et d'une communication au symposium hydrologique de FOZ do IGUAÇU (FERREIRA *et al*, 1989).



3.1.2 Description du bassin

Ce bassin, implanté dans le cadre de la planification de NOUVELOT (1974), cherchait à représenter la zone homogène $H_2, P_1, R_{2-3}, A_{1-2}$. Rappelons-en les caractéristiques :

H_2 : Précipitation annuelle entre 400 et 600 mm.

P_1 : Sous sol imperméable.

R_{2-3} : Relief faible et assez faible.

A_{1-2} : Altitude inférieure à 800 m.

Climat et pluviométrie.

Situé dans une des zones les moins arrosées et les plus irrégulières du Ceará, ce bassin ne reçoit qu'un total pluviométrique moyen annuel de l'ordre de 550 mm, les coefficients de variation annuels atteignant 40 à 45 %. Dans cette région le total médian est de 500 mm, le total décennal sec de 290 et le décennal humide de 900 mm.

Les précipitations, d'origine convective, sont provoquées par une incursion vers le Sud de la Zone de Convergence Intertropicale (ZIC) entre février et mai, le mois de mars étant en général le plus abondant.

Les totaux pluviométriques en 24 h de la microrégion climatique de TAUA sont inférieurs d'environ 10 à 15 % à ceux de l'ensemble de la zone climatique SERTÃO. Le total en 24 heures de période de retour annuelle est estimé à 54 mm, celui de fréquence décennale à 90 mm. Ceci est un signe supplémentaire de la complexité et de la variabilité des systèmes climatiques qui engendrent les précipitations.

Les variations de la température sont faibles. La moyenne annuelle se situe autour de 25° C avec un maximum moyen mensuel entre novembre et janvier (27°) et un minimum en août (24°).

L'humidité de l'air atteint son maximum à la fin de la période des pluies en avril-mai et son minimum en septembre-novembre.

Les vents sont généralement faibles ; leur maximum s'observe en saison sèche.

La durée de l'insolation journalière moyenne varie entre 6h30' en juin-juillet et 9h30' en septembre.

L'évaporation mesurée sur bac de classe A est élevée. Elle atteint son maximum en octobre (10 à 11 mm par jour), mais devient inférieure à 7 mm par jour entre avril et juin. Les totaux annuels évaporés sont de l'ordre de 3000 mm.

Géologie, sols et végétation.

Ce bassin est situé sur le socle cristallin précambrien et constitué surtout de migmatites SUDENE (1968), étroitement imbriquées avec des gneiss, amphibolites, schistes et pegmatites. Cette géologie, chahutée, compliquée dans le détail, entraîne des variations pédologiques très rapides, ceci étant aggravé par les variations des pendages des couches géologiques.

Nous constatons sur la figure 3.1.1, adaptée de LEPRUN *et al* (1983), que les sols bruns non calciques (vertiques ou non et d'épaisseur variable) sont les plus fréquents avec environ 50 à 60 % de la surface totale. Dans les parties planes ou de faible relief, on rencontre souvent des vertisols (environ 10 à 20 % de la surface totale). Ces deux types de sols se développent surtout sur les migmatites basiques et les amphibolites. Les planosols et les solonetz se rencontrent surtout sur les migmatites, pegmatites, schistes et sur les gneiss. Ces sols couvrent 10 à 20 % du bassin et sont plus fréquents dans la partie Nord (sous-bassin de MUNDO NOVO). Les sols lithosoliques et les affleurements rocheux apparaissent un peu partout et couvrent environ 10 % de la zone étudiée.

Cette région n'est pas très peuplée ; les cultures y sont rares, limitées souvent à quelques bas-fonds. On y pratique un élevage extensif dans des propriétés assez grandes, soumis aux aléas des sécheresses.

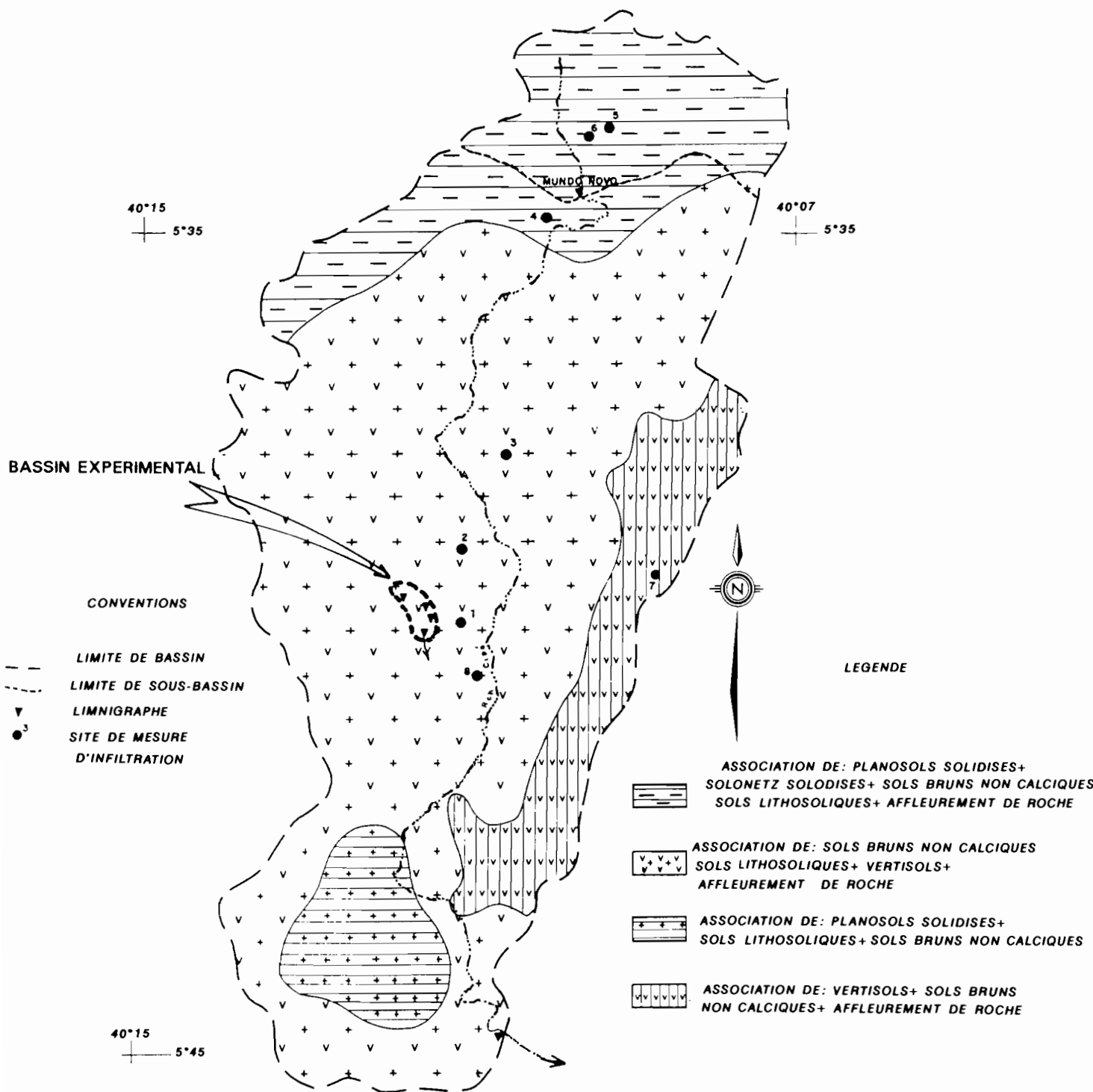
La végétation est le plus souvent constituée de caatinga dense et bien conservée. Cependant le hasard et l'histoire des structures foncières font que l'on rencontre quelques fazendas où les couvertures végétales originelles ont pu être détruites. Nous avons essayé, bien sûr, de tirer parti de cette diversité pour mettre en évidence et quantifier les variations hydrologiques qu'elle induit.

Le tableau 3.1.1 indique les vitesses d'infiltration au bout de six heures, mesurée par la méthode de Müntz. Chaque valeur correspond à la moyenne de trois essais réalisés sur les sites reportés sur la figure 3.1.1 (source : LEPRUN *et al* 1983).

TABLEAU 3.1.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin de TAUA. Méthode de Müntz

Test	Type de sol	Valeur moyenne après 6 heures (mm/h)
TA 01	Lithosolique - Plan - Caatinga naturelle	79
TA 02	Brun non calcique rouge ras (tendance à Solonetz)	37
TA 03	Brun non calcique avec tendance à Vertisol	15
TA 04	Brun non calcique avec tendance à Solonetz	29
TA 05	Planosol	79
TA 06	Planosol dégradé	41
TA 07	Vertisol	24
TA 08	Brun non calcique typique	34

Figure 3.1.1 Carte des sols du bassin représentatif de TAUA



BASSIN DE TAUVA

DIVERSITE DES SOLS ET DES COUVERTURES VEGETALES



Parcelle dénudée noter les variations de la surface du sol



Parcelle protégée du bétail



Autre parcelle située à quelques mètres



Végétation dégradée sur vertisol



Vertisols caractéristiques



Sol lithosolique dénudé. Noter au loin le barrage détruit.

Le tableau 3.1.2 présente certaines caractéristiques physiographiques des différents sous-bassins étudiés.

TABLEAU 3.1.2 Répartition par sous-bassin des principales formations géologiques, types de sol et de végétation du bassin de TAUA

Formation Géologique	Pegmatites et Migmatites		Migmatites basiques amphibolites		Schistes et Gneiss		
	Affleurement et sol lithosolique	Solonetz	Brun non calcique	Verti-sol	Lithosolique peu épais ou planosol dégradé	Lithosolique	Planosol
Perméabilité (mm/h)	0: Affl. 80: Lith.	8	15 à 30	Dépend de la saturation ¹	(41)	80	50 à 80
Capacité de rétention en eau	nulle à faible	faible	moyenne	moyenne à élevée	moyenne	moyenne	très élevée
Pourcentage par sous-Bassin							
MUNDO NOVO	10%	20%	20%	-	-	-	50%
Aç. MOQUEM et JOÃO FRAGOSO ³	10%	5%	70%	15%	-	-	-
AÇUDINHO ⁴	Non déterminé, mais végétation naturelle bien conservée.						
CALDEIRÃO	10%	10%	70%	10%	-	-	-
Aç. LUZIMAR ² et CHICO ⁴	-	-	80%	20%	-	-	-
Aç. JUAZEIRO et NASCIMENTINHO	Non déterminé, mais végétation naturelle bien conservée.						

- (1) Quand ces sols sont saturés, ils sont imperméables ;
 (2) Végétation naturelle très dégradée et sols compactés ;
 (3) Végétation naturelle un peu dégradée ;
 (4) Végétation naturelle bien conservée.

Source: LEPRUN *et al* (1983).

Relief, morphologie et açudes.

Le relief global de ces bassins est faible, R_{2/3} dans la classification ORSTOM (RODIER et AUVRAY 1965). Les dénivelées spécifiques sont de l'ordre de 20 à 30 m ; on sait qu'elles correspondent à peu près aux dénivelées des interfluves. Un examen plus attentif de la morphologie montre cependant que la plus grande partie de ce bassin est composée de zones de pente supérieure à 5 %, ce qui est inattendu pour un relief général si faible. Pour compenser, en quelque sorte, ces pentes, on rencontre des zones planes soit en tête de bassin (où se développent des vertisols), soit dans les bas-fonds et les lits majeurs des cours d'eau les plus importants. Enfin la pente du cours d'eau principal est faible, ce qui contribue certainement à un allongement du temps de base de ses crues.

Les açudes sont relativement nombreux, une trentaine pour une surface totale de 194 km². Nous nous efforcerons aussi de montrer leur influence sur les régimes hydrologiques.

Le tableau 3.1.3 résume les principales caractéristiques morphométriques des trois bassins des TAUA équipés de limnigraphes :

TABLEAU 3.1.3 Caractères morphométriques du bassin de TAUA

Caractères Morphométriques	B a s s i n		
	Pirangi	Mundo Novo	Caldeirão
Taille et forme			
.Surface (km ²)	194*	19*	0,77
.Périmètre (km)	70	20	3,75
.Rectangle équivalent :			
.Longueur (km)	28,10	7,45	1,29
.Largeur (km)	6,91	2,55	0,61
.Indice de compacité C	1,4	1,3	1,2
Pente et Relief :			
.Classe de relief	R 2/3	R 2/3	R 2/3
.Altitude moyenne (m)	490	520	510
.Différence des cotes corresp.			
à 5% et 95 % de la surface (m)	60	27	19
.Indice global de pente (m/km)	2,1	3,6	15
.Dénivelée spécifique (m)	29,7	15,8	13,1
Réseau de drainage :			
.Densité de drainage (km/km ²)	2,13	1,07	4,23
.Nombre de talwegs	721	22	19
.Longueur totale (km)	413	20,4	3,25
.Cours d'eau le plus long (km)	31	5,8	1,6
.Longueur en ligne droite (km)	23	5	1,25

* Surface totale (sans déduire les surfaces contrôlées par les açudes existants.)

3.1.3 Dispositif de mesure installé

La figure 3.1.2 permet de situer les principaux bassins et sous-bassins étudiés.

Les bassins entourés de pointillés ont fourni des données de qualité suffisamment bonne pour donner lieu à une modélisation et à une interprétation hydropluviométrique. Ces bassins sont souvent de petite taille, de quelques dizaines à quelques centaines d'hectares. Ils ont été choisis en fonction des caractéristiques de leurs sols et de leur végétation.

Le schéma de la figure 3.1.3 montre le dispositif de mesure plus dense installé à l'intérieur du bassin du CALDEIRAO (0,77 km²), qui englobe : 4 "micro-bassins" d'environ 1 ha de surface et 5 parcelles d'érosion de 100 m² permettent de mieux connaître le comportement à cette échelle de deux grands types de sol de cette région : les vertisols et les sols bruns non calciques (variantes non vertiques et aussi vertiques).

Ce dispositif de mesure est composé de fosses à sédiments avec partiteur pour les parcelles et de fosses avec déversoirs et limnigraphe pour les microbassins, semblables aux installations du bassin expérimental de SUME, décrites plus loin.

L'ensemble des bassins emboîtés constitués par ces parcelles et micro-bassins (1 ha), le CALDEIRAO (0,77 km²), l'Açude MOQUEM (7,76 km²), la station principale du PIRANGI (194 km²) et la station du réseau général du RIO JAGUARIBE à ARNEIROZ (6.125 km²) fournit quelques indications sur les variations des lames écoulés avec la taille des bassins.



Station de Caldeirão



Fosse à sédiments

Figure 3.1.2 Bassin représentatif du TAUA : Réseau de mesure hydro-pluviométrique et délimitation des bassins versants

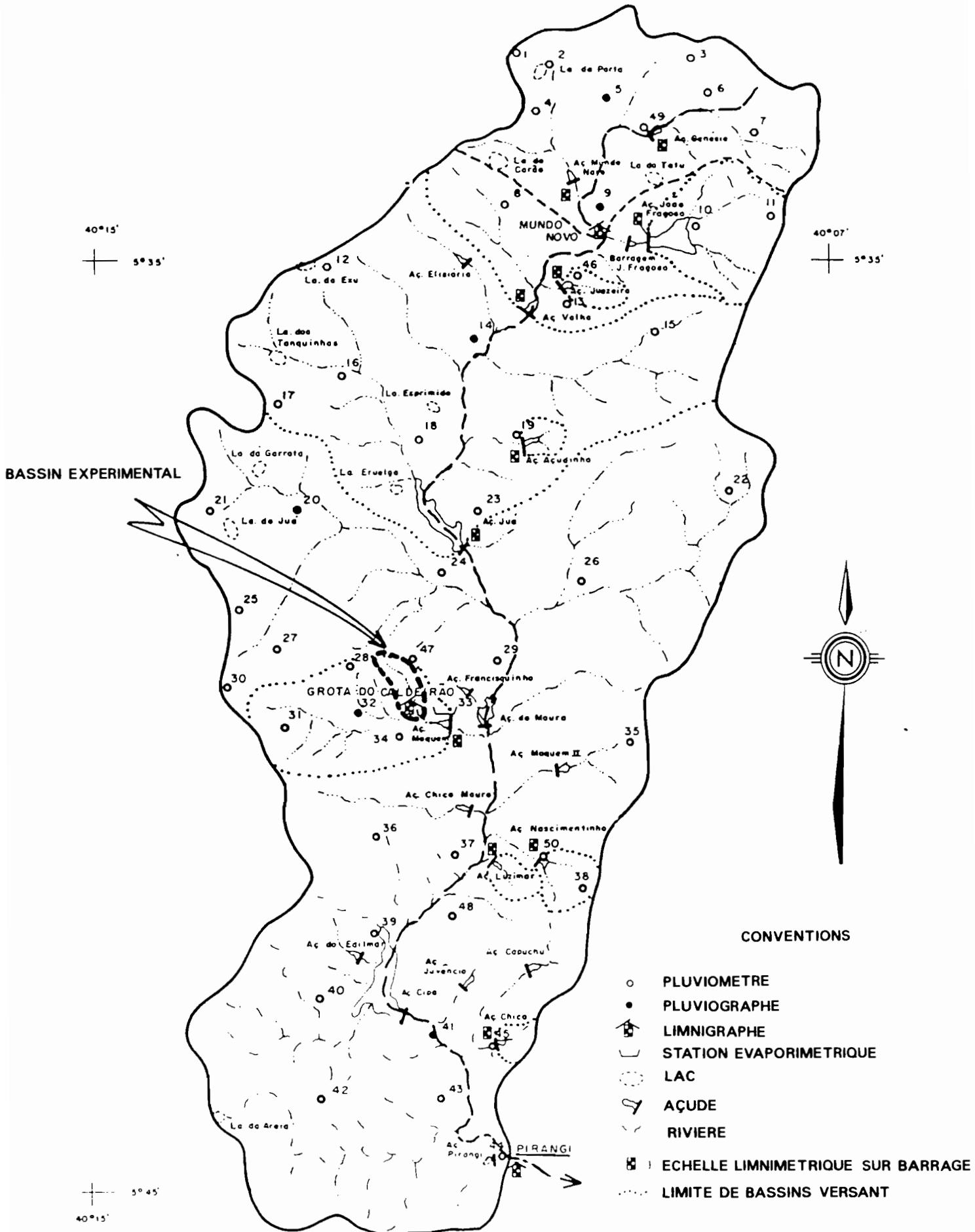
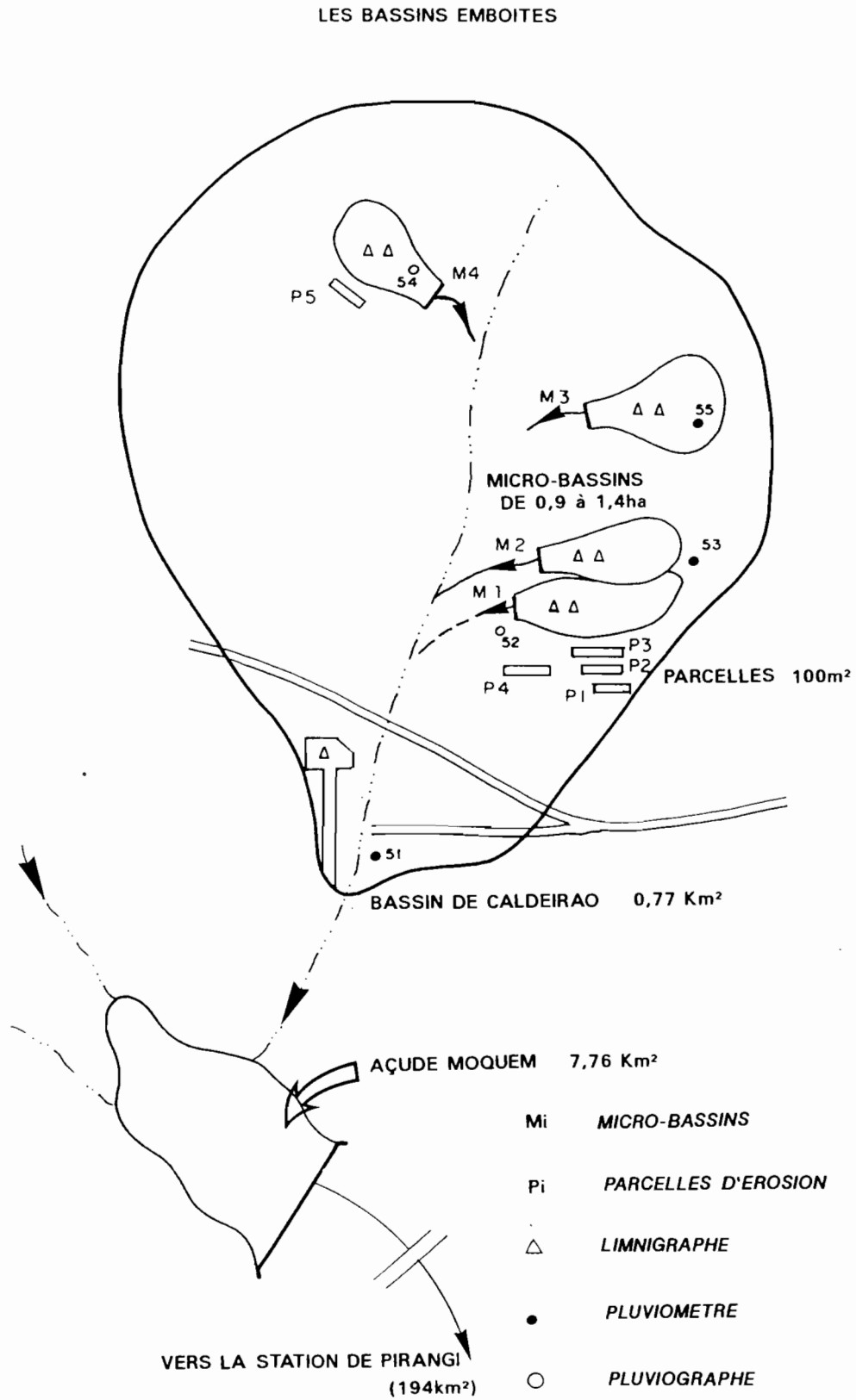


Figure 3.1.3 Croquis de situation des installations du bassin expérimental de TAUA



3.1.4 Résultats obtenus

Chronique des lames observées.

La durée des observations atteint dix ans sur cinq bassins, huit ans sur quatre autres et sept ans sur un dernier.

TABLEAU 3.1.4 Lame écoulee annuelle du bassin de TAUA (mm)

PERIODE	Pluvio métrie	Pirangi	M.Novo	Moq.	J.Fr.	Açud.	Cald.	Luz.	Chico	Juaz.	Nasc.
1978/79	331	0,7	0,6	6,7	1,6	2,7	-	-	-	-	-
1979/80	544	52,4	71,9	169	70	101	-	-	-	-	-
1980/81	662	139,2	274,3	212	210	161	170,4	326	149	104	-
1981/82	318	3,0	0,2	16	5,2	4,2	(12,8)	80	7,1	4,9	6,9
1982/83	216	0,0	0,1	0,9	1,2	1,0	(5,4)	24	0,4	3,9	2,9
1983/84	516	21,8	(85,6)	15	55	61	(23,1)	98	44	49	35
1984/85	1168	(172,8)	(142,7)	266	333	230	(250,1)	395	186	156	220
1985/86	707	(15,4)	(6,2)	92	60	20	(126,1)	234	81	49	49
1986/87	384	(4,7)	(2,4)	11	11	9,4	(20,9)	101	45	24	33
1987/88	625	(54,6)	(63,6)	101	138	71	(90,5)	278	136	78	130
MOYENNE	548	(46,5)	(64,!)	89	89	66	(87,4)	192	81	59	68

En analysant les chroniques ou séries observées du tableau 3.1.4, nous constatons, en ce qui concerne les précipitations, que :

- Les moyennes pluviométriques calculées sur les périodes d'observation sont très proches de la moyenne interannuelle de 550 mm estimée pour le bassin de TAUA.
- Au cours de cette période on a observé en tout :
 - . quatre années nettement déficitaires : 1979, 82, 83 et 87,
 - . quatre années excédentaires : 1981, 1985, 1986 et 1988,
 - . deux années que l'on pourrait qualifier de normales¹ : 1980 et 1984.
- Les années sont loin de se ressembler ; trois de ces années sont de plus vraiment exceptionnelles :
 - . 1985, (1.265 mm), est exceptionnellement abondante avec une période de retour de l'ordre de 20 ans.
 - . 1981 (685 mm) dont le total n'est que légèrement supérieur à la moyenne, mais qui est caractérisée par une très forte concentration des pluies en mars, dont le total a été de l'ordre de 450 mm, ce qui correspond à une période de retour supérieure à 20 ans.
 - . 1983 (203 mm) est, inversement, une année de sécheresse catastrophique, dont la période de retour est estimée à 50 ans. Cette année a été, circonstance aggravante, précédée d'une année déjà fortement déficitaire.

1 Le nombre des années dites "normales", paradoxalement minoritaires, reflète la grande irrégularité des régimes climatiques, qui peut nous faire dire que, dans le Sertão, la sécheresse ou les inondations correspondent à la majorité des cas, la moyenne ou la normale étant finalement exceptionnelle.

Ainsi on a observé, dans cette région déshéritée et au cours de la courte période de 1981 à 1985, des paroxysmes des deux fléaux climatiques qui peuvent atteindre (on dit *châtier* en brésilien) le Sertão Nordestin : les sécheresses et les inondations :

- **Les inondations** : 1981 et 1985 ont été des années d'inondations mémorables ; on ne compte plus les cas de ruptures de barrage et les pertes de cultures par excès d'eau, dans les zones mal drainées.
- **Les sécheresses** : en 1983, par contre, beaucoup de rivières n'auront pas du tout coulé, les cultures pluviales ont été le plus souvent perdues et le bétail décimé par trois années déficitaires sur le plan agronomique. Ainsi, paradoxalement, les pluies de 1981 qui ont provoqué des inondations se sont arrêtées brusquement début avril, ne permettant pas l'accomplissement normal des cycles culturaux ; 1982 aura été de médiocre à mauvaise et 1983 catastrophique !

TABLEAU 3.1.5 Variabilité des écoulements annuels sur les bassins de TAUA

E C O U L E M E N T S							
	PÉRIODE	NOMBRE D'ANNÉES	PRECIPI TATION	LAME OBSERVÉE	$\frac{81+85}{\text{TOTAL}}$	$\frac{L_{550}}{L_{550}}$	$\frac{L_{\text{obser}}}{L_{550}}$
PIRANGI	79-88	10	547mm	46 mm	0,67%	(36)	1,28%
MUNDO NOVO	79-88	10	525	65	0,64	(57)	1,14
Aç. MOQUEM	79-88	10	543	89	0,54	70	1,27
Aç. J. FRAGOSO	79-80	10	526	89	0,61	57	1,56
Aç. AÇUDINHO	79-80	10	528	66	0,59	54	1,22
MOYENNE sur 10 ans			534		0,61		1,29
CALDEIRAO	81-88	8	563	83	0,60	70	1,19
Aç. LUZIMAR	81-88	8	610	182	0,47	144	1,16
Aç. CHICO	81-80	8	614	77	0,51	52	1,48
Aç. JUAZEIRO	81-88	8	561	56	0,55	44	1,27
Aç. NASCIMENTINHO	82-88	7	556	68	-	67	1,01
MOYENNE sur 8 et 10 ans			557		0,58		1,24

L_{550} - On appelle L_{550} la lame écoulé moyenne interannuelle estimée par modélisation sur un bassin pour une pluviométrie annuelle de 550 mm ce qui est le cas de TAUA.

En ce qui concerne les écoulements, nous constatons sur les tableaux 3.1.4 et 3.1.5 que :

- les variations relatives des écoulements d'une année sur l'autre sont bien supérieures à celles des précipitations. Pratiquement les deux années 1981 et 1985 totalisent, à elles seules, 60 % des volumes écoulés sur la période de dix ans. On observe, ces années-là des coefficients annuels d'écoulement qui s'élèvent à 20 ou 30 %. Par contre, les écoulements de 1983 furent pratiquement nuls et ceux de 1978, 1982 et 1987 ont été très faibles.
- Les lames moyennes observées sur cette période 1979 à 1988 surestiment de près de 40 % la valeur interannuelle estimée par modélisation, appelée L_{550} . Ceci montre que, dans ces régions de très

forte variabilité climatique, une période de dix ans de mesure est encore insuffisante pour estimer directement les lois de distribution des écoulements, **sans faire appel à des techniques "correctives" de modélisation et ou d'homogénéisation**, pour corriger les valeurs brutes observées.

Les crues

Le tableau 3.1.6 résume les caractéristiques des crues unitaires des trois bassins équipés de limnigraphe.

Nous présentons dans ce tableau les caractéristiques des crues suivantes :

a) Les paramètres de l'hydrogramme unitaire, au sens de SHERMANN :

- les temps de base et de montée
- le débit maximum pour une lame ruisselée de 1 mm
- le rapport $\alpha = Q_{\max}/Q_{\text{moy}}$ qui est lié à la forme de l'hydrogramme (α vaut 2 pour une forme triangulaire)

b) Des paramètres permettant le calcul de la crue décennale :

- X_{10} la lame ruisselée estimée de la crue décennale
- K_x est la moyenne des débits maximums correspondant à une lame de 1 mm des hydrogrammes des dix plus fortes crues
- Q_{10} , débit de pointe de la crue décennale calculée par la formule $Q_{10} = K_x \cdot X_{10}$

TABLEAU 3.1.6 Caractéristiques des crues du bassin de TAUA

Bassin	Surface	Hydrogramme unitaire			$\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{moy}}}$	X_{10}	K_x moy.	Q_{10}
		Temps de montée	Temps de base	Débit Maxi pour $L_s=1\text{mm}$				
Pirangi	194 km ²	4 h	20 h	6,7 m ³ /s	2,7	26mm	3,44 m ³ /s	90 m ³ /s
Mundo Novo	19 km ²	2 h	6 h	1,84 m ³ /s	2,1	56mm	1,27 m ³ /s	71 m ³ /s
Caldeirão	0,77 km ²	0h40'	2 h	0,3 m ³ /s	2,8	37mm	0,20 m ³ /s	7,4 m ³ /s

Les débits de la crue décennale de Mundo Novo sont élevés par rapport à sa surface. Par contre ceux de Pirangi sont anormalement faibles. Ceci est dû à la forme allongée de ce dernier bassin qui étale les crues.

Lames écoulées caractéristiques

Le tableau 3.1.7 fournit les valeurs des lames écoulées annuelles caractéristiques de différentes fréquences, des lames moyennes sous l'isohyète de référence de 600 mm (L_{600}) et sous l'isohyète de 550 mm, ce qui correspond, en fait, à la situation réelle du bassin de TAUA, des lames accumulées au cours de périodes de

plusieurs années sèches consécutives, des coefficients moyens d'écoulement annuel et des lames de crue décennale.

Les valeurs de ce tableau ont été obtenues par modélisation sur les données de 14 bassins qui avaient été jugées exploitables.

Nous allons essayer d'interpréter leurs variations en fonction de notre connaissance des caractéristiques physiographiques des bassins d'alimentation.

TABLEAU 3.1.7 Lames écoulées caractéristiques (mm) du bassin de TAUUA

BASSIN	E C O U L E M E N T S									
	L ₆₀₀	L(550)	DECEN.	TRIEN.	MEDIAN	TRIEN.	DECEN.	L(3AC)	CRUE	COEF. ECOUL. MOY.(%)
			HUMIDE LA01	HUM. LA033	LA05	SEC LA067	SEC LA099		DECEN. X ₁₀	
AÇUDE LUZIMAR	170	144	275	186	132	91	43	205	66	26
MICROBACIA Nº 3	96	82	176	101	65	37	(11)	75	52	15
MICROBACIA Nº 1	90	77	149	92	67	43	(18)	85	42	14
AÇUDE MOQUEM	82	70	176	91	56	25	(4)	60	51	13
CALDEIRAO	82	70	156	88	58	33	(13)	70	37	13
NASCIMENTINHO	79	67	149	85	57	31	(11)	67	45	12
MICROBACIA Nº 2	79	67	130	82	60	37	(14)	73	39	12
AÇUDE J.FRAGOSO	67	57	141	73	44	21	(6)	52	48	11
BACIA MUNDO NOVO	(67)	(57)	(148)	(71)	(43)	(18)	(3)	(33)	(56)	(11)
AÇUDINHO	64	54	136	71	43	19	(3)	46	45	10
AÇUDE CHICO	61	52	111	67	44	26	(9)	53	32	10
AÇUDE JUAZEIRO	52	44	93	59	37	26	(9)	56	20	8
BACIA PIRANGI	(42)	(36)	(85)	(43)	(26)	(13)	(2)	(20)	26	6,5
MICROBACIA Nº 4	33	28	74	33	(20)	(8)	(1)	16	25	5,1

Définition des lames écoulées caractéristiques du tableau précédent :

- L₅₅₀ est la lame écoulée moyenne annuelle, estimée par modélisation sur un bassin pour la pluviométrie annuelle de 550 mm de TAUUA.
- L₆₀₀ : Lame écoulée estimée pour une pluviométrie de 600 mm
- Les lames annuelles correspondants aux fréquences au dépassement F de :
 - . F = 0,10 lame décennale humide, appelée plus loin LA01
 - . F = 0,33 lame triennale humide, appelée plus loin LA05
 - . F = 0,50 lame médiane humide, appelée plus loin LA05
 - . F = 0,67 lame triennale sèche, appelée plus loin LA067
 - . F = 0,90 lame décennale sèche, appelée plus loin LA09

- La lame correspondant à l'écoulement accumulé au cours d'une période de trois années déficitaires consécutives, appelée aussi L3AC. Cette lame est estimée par des techniques de modélisation et correspond à une sécheresse de période de retour d'environ 20 à 30 ans.
- X10 la lame de la crue décennale, estimée par modélisation
- Le coefficient d'écoulement moyen annuel.

3.1.5 Interprétation : Les acquis du bassin de TAUÁ

3.1.5.1 Principaux types de comportements hydrologiques

Pour caractériser les différents aspects des régimes hydrologiques nous avons choisi les coefficients suivants :

- L_{600} : Lame écoulée moyenne interannuelle standard sous l'isohyète 600 mm.
- Trois coefficients qui caractérisent l'irrégularité interannuelle :

$\frac{LA01}{L550}$	$\frac{LA05}{L550}$	$\frac{LA09}{L550}$
---------------------	---------------------	---------------------
- Un coefficient qui caractérise la sévérité des périodes d'années sèches consécutives :

$\frac{L3AC}{L550}$

- La valeur de la lame de la crue décennale X_{10} et le coefficient :

$\frac{X10}{L550}$

Nous avons essayé de regrouper les bassins du tableau 3.1.6 en fonction de leurs écoulements et de leurs caractéristiques physiographiques.

Nous avons pu séparer les bassins en deux groupes principaux :

Le groupe a, constitué par tous les bassins qui ne contiennent aucun açude¹³. Ce groupe a été sous-divisé en 4 sous-groupes numérotés de a1 à a4.

Le groupe b, constitué de bassins contenant un ou plusieurs açudes.

13 Pour cela, on ne prend évidemment pas en compte l'açude situé à l'exutoire d'un bassin quand il n'en existe pas d'autre en amont.

TABLEAU 3.1.8 Principaux groupes ou types de comportement hydrologique du bassin de TAUA

Groupe	L ₆₀₀	L ₅₅₀	LA01	LA05	LA09	L3AC	X ₁₀ (mm)	X10
			----- L ₅₅₀	----- L ₅₅₀	----- L ₅₅₀	---- L ₅₅₀		---- L ₅₅₀
a.1	170	144	1,91	0,92	0,3	1,42	66	0,46
a.2	75 - 120	65 - 100	1,9 - 2,5	0,79 - 0,90	0,06 - 0,23	0,86 - 1,10	39 - 52	0,53-0,73
a.3	60 - 75	45 - 65	1,9 - 2,5	0,77 - 0,90	0,06 - 0,21	0,85 - 1,09	32 - 48	0,58-0,84
a.4	25 - 60	20 - 45	2,1 - 2,6	0,71 - 0,84	(0,04)-(0,2)	0,57 - 1,27	20 - 25	0,45-0,89
b	30 - 60	40 - 70	2,3 - 2,6	0,72 - 0,79	0,05 - 0,06	0,56 - 0,58	26 - 56	0,72-0,98

3.1.5.2 Description des principaux groupes:

- **Le sous-groupe a.1** : n'est malheureusement représenté que par un seul bassin, celui de l'açude LUZIMAR. Ce tout petit bassin est caractérisé par des écoulements exceptionnellement élevés. L₆₀₀ est de l'ordre de 170 mm; c'est de loin la plus forte valeur observée jusqu'à présent sur tous les petits bassins du Nordeste. Le coefficient moyen annuel d'écoulement y est de l'ordre de 0,26.

La régularité du régime est très élevée pour cette région. Ainsi la valeur de 0,3 du coefficient LA09/L₅₅₀ signifie que l'écoulement de l'année décennale sèche représentera encore le quart de la moyenne, alors que l'on observe en général, dans cette région, des valeurs décennales beaucoup plus faibles ou nulles. Inversement le volume de la crue décennale ne représente que 41 % du volume moyen annuel, autre signe de régularité.

Le petit bassin de l'açude LUZIMAR est caractérisé par de fortes pentes, une végétation exceptionnellement dégradée, inexistante par endroits. On y rencontre des zones de sol brun non calcique nu, à la surface compactée, qui pourrait être un cas d'école pour mettre en évidence les rares effets pelliculaires de surface dans le Nordeste. Ces parties du bassin, même sèches, sont extrêmement propices au ruissellement des grandes et des petites pluies, ce qui explique la régularité de ce bassin, surtout caractérisée par l'abondance relative des écoulements au cours des années déficitaires.

- **Le sous-groupe a.2** : correspond, pour la région de TAUA, aux petits bassins où l'on observe les plus forts écoulements, sans atteindre les extrêmes observés sur le bassin de l'açude LUZIMAR. Ce sont des bassins qui possèdent généralement de fortes pentes, une végétation relativement dégradée et un faible pourcentage de vertisols.

Les bassins des açudes MOQUEM et NASCIMENTINHO, les micro-bassins 1, 2 et 3 et le bassin du CALDEIRÃO représentent ce groupe. L₆₀₀ varie entre 80 et 95 mm, la régularité est encore forte avec des valeurs de LA09/L₅₅₀ de 0,06 à 0,23. L3AC/L₅₅₀ varie entre 0,86 et 1,10 et X₁₀/L₅₅₀ est de l'ordre de 0,53 à 0,73.

- **Le sous-groupe a.3** : correspond, en gros, au comportement médian des petits bassins de la région de TAUA. On y trouve les bassins des açudes AÇUDINHO, CHICO et JOAO FRAGOSO et le bassin n°2. La végétation des deux premiers bassins est très dense, et n'a pas subi de dégradation importante. Ceci pourrait expliquer les valeurs plus faibles des écoulements observés sur ces bassins, par rapport à ceux du groupe a.2.

Le bassin de l'açude JOAO FRAGOSO, plus grand, commence à présenter un certain nombre de bas-fonds et de dépressions alluviales, que l'on n'observe pas dans le bassin de l'açude MOQUEM, de taille comparable; ceci pourrait expliquer l'écoulement plus faible de JOAO FRAGOSO.

Nous n'avons pas, pour le moment, d'explication physique logique à fournir pour les écoulements plus faibles calculés pour le micro-bassin 2, par rapport aux deux autres micro-bassins 1 et 3. Est-ce dû au manque de précision de la modélisation, de la mesure des débits ou de l'estimation de la surface réelle de ces bassins, dont la partie amont est très plane ? Ou encore à des problèmes plus fondamentaux tels que des différences de mécanismes hydrologiques provoquées, par exemple, par des variations de composition ou de pendage des roches de ces bassins qui n'auraient pas encore été perçues ?

Les L_{600} de ce sous-groupe a.3 sont encore élevées et varient entre 60 et 80 mm. L'irrégularité est plus élevée; LA_{09}/L_{550} est situé entre 0,06 et 0,21 ; L_{3AC}/L_{550} varie entre 0,8 et 1,1 et X_{10}/L_{550} est de l'ordre de 0,5 à 0,9.

- **Le sous-groupe a.4** : correspond aux bassins qui ont le moins "coulé". Les L_{600} de ce sous-groupe sont bien plus faibles que pour les groupes précédents et varient entre 30 et 60 mm. L'irrégularité est beaucoup plus élevée. LA_{09} est pratiquement nulle ; L_{3AC}/L_{550} oscille entre 0,5 et 0,13 et X_{10}/L_{550} entre 0,4 et 0,9.

Cet ensemble est représenté par un bassin dont la végétation est particulièrement bien conservée, le bassin de l'açude JUAZEIRO et par le micro-bassin 4 couvert complètement de vertisol ("Massapê" en brésilien), pratiquement dépourvu de végétation et avec des pentes moyennes de l'ordre de 5 %, ce qui est très élevé pour des vertisols. Il semble clair que ce sont les fentes de retrait dues aux argiles gonflantes qui font que ce type de bassin absorbe pratiquement toutes les premières pluies, puis commence, à partir d'un certain taux de saturation, à restituer une fraction de plus en plus grande des écoulements. Ils présentent enfin, dans des conditions de forte saturation hydrique, une perméabilité quasi nulle et des lames de crues relativement fortes. Ceci est directement mis en évidence par les observations et a été confirmé par la modélisation subséquente. La quantification des écoulements des vertisols, la mise en évidence de leur très forte capacité de stockage et de leur tendance à aggraver fortement l'irrégularité hydrologique, constitue un des acquis importants et originaux obtenus sur le bassin de TAUA.

- **Le groupe b** : est constitué par les deux bassins plus grands de MUNDO NOVO et PIRANGI, qui contiennent des açudes importants et nombreux, lesquels retiennent évidemment une bonne part de l'écoulement. Les L_{600} sont faibles et varient entre 30 et 50 mm ; l'irrégularité est très forte; la lame décennale sèche est pratiquement nulle ; L_{3AC}/L_{550} est voisin de 0,6 et X_{10}/L_{550} entre 0,7 et 1.

Sur ces bassins, les açudes, les bas-fonds et les lits majeurs aggravent l'irrégularité. Ainsi, au cours des années déficitaires, les açudes ne se rempliront pas et intercepteront donc une grande partie des écoulements en provenance des têtes de bassins. Ceci est particulièrement vrai après 1983 pour le bassin de PIRANGI, dont près de 90 % de la surface de drainage est contrôlée par le grand açude CIPO, construit cette année-là.

Inversement, les crues les plus dangereuses surviennent le plus souvent quand les conditions de saturation hydrique sont élevées, que les açudes sont pleins et donc incapables de retenir une partie supplémentaire des écoulements. Ils peuvent, tout au plus étaler les crues et amortir leurs pointes, quand ils ne contribuent pas, par suite de leur rupture accidentelle, à générer des débits catastrophiques. Tout ceci explique les fortes valeurs de X_{10}/L_{550} observés sur ces bassins.

3.1.5.3 Variation des lames écoulées sur un ensemble de bassins emboîtés

Nous disposons, parmi les bassins observés, d'un ensemble de bassins emboîtés correspondant à 5 ordres de grandeur de surface bien différents: 1 ha, 1 km², 10 km², 200 km² et 6000 km².

Essayons d'en comparer les modules :

Il y a quatre bassins tout petits :

- Micro-bassin 1 (0,97ha) : $L_{550} = 77$ mm
- Micro-bassin 2 (1,41 ha) : $L_{550} = 67$ mm
- Micro-bassin 3 (0,93 ha) : $L_{550} = 82$ mm
- Micro-bassin 4 (1,09 ha) : $L_{550} = 28$ mm

Ces micro-bassins sont inclus dans le :

- Bassin du CALDEIRAO (0,77 km²) : $L_{550} = 70$ mm, qui fait à son tour partie du :
- Bassin de l'Açude MOQUEM (7,76 km²) : $L_{550} = 70$ mm, qui fait partie du :
- Bassin du Rio PIRANGI (194 km²) : $L_{550} = 36$ mm, qui est enfin contrôlé par le grand bassin du réseau général du :
- Rio JAGUARIBE à ARNEIROZ (6.125 km²), dont l'écoulement moyen est estimé entre 30 et 40 mm avec une médiane de 15 à 20 mm.

On peut faire les constatations suivantes :

- Le bassin du CALDEIRAO est composé, dans sa plus grande partie de sols bruns non calciques comparables à ceux des micro-bassins 1, 2 et 3 et dans une proportion bien plus faible de vertisols semblables à ceux du micro-bassin n°4. La valeur de L_{550} (70 mm) trouvée pour ce bassin peut donc être considérée comme l'intégration des écoulements estimés sur chacun des micro-bassins élémentaires, avec un poids plus faible attribué au micro-bassin n°4. On montre ainsi, par l'absurde, qu'il est impossible, avec les chiffres dont nous disposons, de mettre en évidence une perte d'écoulement ou une dégradation hydrographique entre les bassins élémentaires de 1 ha et le bassin de 1 km². Ceci est à rapprocher du fait que l'on ne rencontre pas dans ce bassin de zone sableuse alluviale ou de bas-fond important.

- La variation de lame écoulée entre le bassin du CALDEIRAO (0,77 km²) et de l'açude MOQUEM (7,76 km²) n'est pas non plus significative. On ne peut pas non plus mettre en évidence de différences de comportement entre ces deux bassins dont les couvertures pédologiques sont semblables et qui sont toutes les deux dépourvues de bas-fonds importants.
- Par contre, la lame écoulée L₅₅₀ passe de 70 à 36 mm entre le bassin de l'açude MOQUEM (7,76 km²) et celui du PIRANGI (194 km²). Cette diminution importante de l'écoulement doit être tout d'abord attribuée à la présence de plus de 30 açudes dont le volume total est estimé entre 3.000.000 et 5.000.000 de m³ ce qui correspond à une lame de 15 à 25 mm répartie sur tout le bassin. Remarquons enfin la plus grande proportion de bas-fonds, de zones alluviales et de faible relief, ce qui est naturel pour un bassin plus grand dans une zone globalement homogène sur le plan morphologique¹⁴.
- Enfin nous avons comparé les résultats obtenus sur le BVR de TAUA aux lames écoulées du rio JAGUARIBE à ARNEIROZ (6.125 km²), qui l'englobe. L'estimation faite pour ARNEIROZ est supérieure à celle de PIRANGI. Nous savons que la pluviométrie moyenne interannuelle de ce bassin est de l'ordre de 600 mm, et que son sous-sol est cristallin, ce qui le range dans la même catégorie de bassin. Mais nous ne connaissons pas suffisamment ses autres caractéristiques (pédologie, densité d'açudes, importance des bas-fonds, etc.), pour tenter d'interpréter les différences constatées.

3.1.6 Conclusion du bassin de TAUA

Les quatorze sous-bassins de TAUA, qui ont pu être modélisés, apportent de nombreuses informations inédites sur les régimes hydrologiques de cette région:

■ Module annuel

La lame moyenne écoulée annuelle des petits bassins de cette région, sur socle cristallin précambrien, couverts de sols peu épais varie entre 50 et 80mm.

La présence de vertisol ou de végétation dense tend à diminuer fortement cet écoulement, à l'inverse de ce qui se passe quand on rencontre des solonetz ou des zones dont la végétation est dégradée.

L'irrégularité interannuelle est forte. Un année sur trois, les écoulements n'atteignent pas la moitié ou le quart de la moyenne, ils sont presque nuls tous les dix ans. L'irrégularité est moins forte sur les bassins qui sont peu perméables et dépourvus de zone de rétention d'eau.

■ Nouveaux types de bassins

On a pu étudier deux nouveaux types de bassins: l'un est complètement situé sur vertisol; l'autre constitue ce que l'on pourrait appeler un impluvium. Il est recouvert de zones de sols dont la

¹⁴ Ce facteur n'a pas joué de façon sensible entre 1 et 10 km².

surface est dégradée par l'homme, compacte et lisse. Nous y avons observé les plus forts coefficients d'écoulement mesurés jusqu'ici dans le Nordeste.

■ Taille du bassin

Des mesures, effectuées sur un ensemble de bassins emboîtés dont la surface varie entre 1 ha et 10 km², montrent que les écoulements annuels ne varient pas d'une manière significative avec la taille du bassin. Notons que l'on ne rencontre sur ces bassins aucune zone importante susceptible de retenir de l'eau.

Quand la taille du bassin augmente encore, jusque vers 200 km², les écoulements annuels décroissent d'une trentaine de mm. Ceci est à rapprocher du grand nombre d'açudes construits sur ce grand bassin et de la présence de zones sableuses dans les bas-fonds. Il est regrettable que l'on n'ait pas pu comparer les écoulements mesurés sur le BVR de TAUA avec les écoulements captés au cours de la même période par le grand açude "VARZEA DO BOI" situé en aval.

■ Typologie de bassins

Une typologie régionale de bassins a pu être ébauchée. Les facteurs principaux de cette typologie sont le sol, la végétation et le nombre d'açudes construits à l'intérieur des bassins.

3.2 LE BASSIN REPRESENTATIF DE SUME

Les informations apportées par le bassin de SUMÉ proviennent essentiellement de l'ensemble de parcelles expérimentales, avec lesquelles on a pu mettre en évidence, par exemple, un facteur d'accroissement de l'écoulement de l'ordre de 20, provoqué par la suppression de la végétation et la dégradation de la surface du sol.

3.2.1 Historique

L'objectif initial de cet ensemble de bassins représentatifs était l'étude du bassin d'alimentation de 768 km² de l'açude "public" de 37.000.000 m³ construit par le DNOCS à SUMÉ. Le réseau de mesure hydropluviométrique, installé à partir de 1972 par la SUDENE et l'Université Fédérale de la Paraíba (UFPB) était composé de 48 pluviomètres, 6 pluviographes, 4 limnigraphes et une station météorologique.

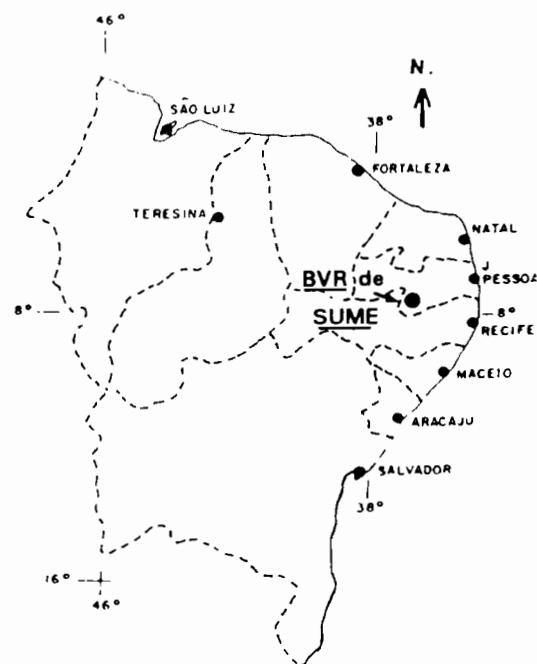
En 1974 le dispositif installé se révéla trop lourd et incapable, avec les moyens logistiques disponibles, de fournir les résultats espérés, principalement pour des raisons d'instabilité des stations hydrométriques et de difficultés d'accès en saison des pluies. Suivant les conseils de l'ORSTOM, les moyens disponibles furent concentrés sur le bassin de GANGORRA (137 km²) et sur deux de ses sous-bassins : JATOBA (27 km²) et UMBURANA (10,7 km²).

Les deux stations de JATOBA et GANGORRA ont été stabilisées par des déversoirs jouant le rôle de section de contrôle. Le réseau pluviométrique a été réduit à 36 pluviomètres ; le suivi des niveaux de quatre açudes a également démarré à cette époque.

Les deux sous-bassins de JATOBA et UMBURANA, ce dernier n'étant malheureusement pas stabilisé, avaient été choisis pour représenter deux types bien différents de bassins situés l'un sur roche plutonique, l'autre sur roche métamorphique. Nous y reviendrons plus tard.

En 1981, dans le cadre d'un projet, financé par le CNPq, appelé "Bassin Expérimental", l'UFPB, la SUDENE et l'ORSTOM installaient un nouveau dispositif composé de 4 microbassins et de 5, puis, 9 parcelles expérimentales destinés à quantifier l'influence du couvert végétal et des pratiques culturales sur l'écoulement et l'érosion d'une zone de sols bruns non calciques vertiques, semblables à ceux qui couvrent une bonne part du bassin de d'UMBURANA. Le suivi de quatre nouveaux açudes a commencé, également, à cette époque.

De 1986 à 1989, un projet financé par une Action Thématique Programmée (ATP) du Programme PIREN impliquant le CNRS, l'INRA et l'ORSTOM avec la SUDENE et l'UFPB, fédérait les organismes intervenant dans le projet précédent autour d'une étude beaucoup plus fine des mécanismes hydrologiques.



Ce projet a permis l'introduction, par l'ORSTOM, de techniques et d'appareils nouveaux sur les bassins représentatifs brésiliens tels que l'infiltromètre à aspersion, les sondes à neutrons et les tensiomètres.

En 1990, l'UFPB reste le seul organisme intervenant sur ce bassin dont le réseau de mesure a été réduit au dispositif du suivi des 13 parcelles et microbassins ainsi que du bassin d'UMBURANA.

Les résultats obtenus sur le bassin de SUMÉ ont fait l'objet d'un nombre important de publications. Nous pouvons citer, en nous excusant des oublis éventuels:

- Synthèse partielle des résultats obtenus sur le bassin représentatif pour la période 72-80 (CADIER et FREITAS, 1983).
- Présentation des premiers résultats obtenus sur le bassin expérimental (CADIER *et al*, 1983).
- Plusieurs communications à des symposiums: CADIER *et al* (1983), MOLINIER (1985), GOMES *et al* (1987), SRINIVASAN *et al* (1988), MOLINIER *et al* (1989b)
- Deux rapports d'ATP : AUDRY *et al* (1987), MOLINIER *et al* (1989a).
- Une thèse de "mestrado" (GALVAO, 1990).

3.2.2 Description du bassin

Installé antérieurement à la planification réalisée par NOUVELOT(1974), le BVR de SUME se trouve dans la zone homogène H₂, P₁, R₄, A₂ dont nous rappelons les caractéristiques:

H₂ : Précipitation annuelle entre 400 et 600 mm.

P₁ : Sous sol imperméable.

R₄ : Relief modéré.

A₂ : Altitude comprise entre 500 et 800 mm.

Climat, pluviométrie.

Situé, à vol d'oiseau, à 250 km de la côte atlantique, dans le Sertão du Cariri, SUMÉ se trouve par la route à 450 km de Recife et à 130 de Campina-Grande, siège de l'UFPB.

La pluviométrie y est faible et irrégulière; on estime sa moyenne interannuelle entre 550 et 600 mm avec un coefficient de variation élevé, de l'ordre de 40 %, (JACCON, 1982).

Ce bassin se trouve légèrement à l'ouest du centre de la dépression pluviométrique induite par les reliefs de la chapada de la Borborema qui intercepte les masses d'air océaniques et crée, par effet d'écran ou de foehn, une zone dont la pluviométrie moyenne est probablement inférieure à 400 mm, centrée sur Cabaceiras, qui a longtemps été appelé le "pôle de la sécheresse du Brésil".

L'analyse des chroniques de pluies en 24 h et des intensités montre un régime pluviométrique normal pour cette partie du Sertão : pluie annuelle en 24 heures de 61 mm, valeur décennale de 107 mm, intensités décennales de 70 mm/h en 60', de 80 mm/h en 30' et de 125 mm/h en 10', etc.

Comme dans toute la partie nord du Sertao, la saison des pluies est centrée sur mars, commençant en général entre janvier et mars et s'arrêtant en mai. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 24°C

(maximum en novembre-décembre et minimum en juillet-août). L'évaporation annuelle est de l'ordre de 2800 mm sur bac classe A.

Géologie, pédologie, végétation et occupation du sol

Les sols de la région sont connus grâce aux travaux cartographiques à l'échelle de 1/500.000^{ème} de l'EMBRAPA/SUDENE (1971) et par une esquisse au 1/100.000^{ème} du bassin de SUME (LEPRUN *et al.*, 1983).

Ce bassin est entièrement situé sur le socle cristallin précambrien. Son sous-sol est imperméable, et il n'y a pas d'aquifère généralisé; on peut y rencontrer des petites nappes confinées dans des failles ou dans des formations alluviales superficielles, souvent près des cours d'eau.

Grandes familles de roches et de sols :

On rencontre, sur le bassin de SUME, deux grandes familles de roches appartenant au socle cristallin précambrien :

- Les granites alcalins qui engendrent des sols podzoliques rouges à jaunes, épais, perméables. Ces sols sont très souvent cultivés et sont presque complètement occupés par de moyennes et petites propriétés qui ont remplacé une grande partie de la caatinga originelle par des cultures. Les bassins de cette zone sont entourés par des reliefs rocheux et souvent par des chaos de boules granitiques.
- Les formations métamorphiques, principalement composées de schistes, de paramphibolites et de gneiss sur lesquels se développent des sols bruns non calciques souvent vertiques. Les gneiss et les quartzites engendrent des sols lithosoliques.

Dans ce deuxième type de formation, couverte de sols moins épais et moins faciles à mettre en valeur que la précédente, la densité de population est moindre et la taille des propriétés y est en général bien plus grande. Les "fazendas", traditionnellement tournées vers l'élevage extensif, ont peu altéré, en général, la végétation naturelle composée de caatinga, système arbustif dense et difficilement pénétrable. Cette couverture végétale est parfois détruite pour produire du charbon de bois.

Caractérisation des sous-bassins :

Les trois sous-bassins de SUME représentent les zones suivantes :

- Le bassin de JATOBA est couvert, lui, aux trois quarts par des granites et migmatites et des sols podzoliques.
- Le bassin d'UMBURANA, situé sur roches métamorphiques, a été choisi pour représenter ce deuxième type d'écosystème.
- Le plus grand bassin de GANGORRA intègre les deux formations précédentes.

Le relief général de tous ces bassins est plus fort que celui de TAUA, mais inférieur à celui du Riacho do Navio (dénivelées spécifiques de l'ordre de 25 à 50 m et classe de relief 3 à 4). Mais les pentes des sols sont en fait du même ordre de grandeur, et nous constatons que c'est davantage "l'amplitude" du relief que les pentes transversales qui varient.

Enfin, notons que l'on rencontre, dans les trois bassins étudiés, des zones alluviales couvrant des surfaces relativement modestes (de 1 à 7 % des superficies), mais situées à l'aval, près de cours d'eau principaux. Ces alluvions ont évidemment un rôle important dans le transfert (et la rétention) des écoulements en provenance des zones en amont.

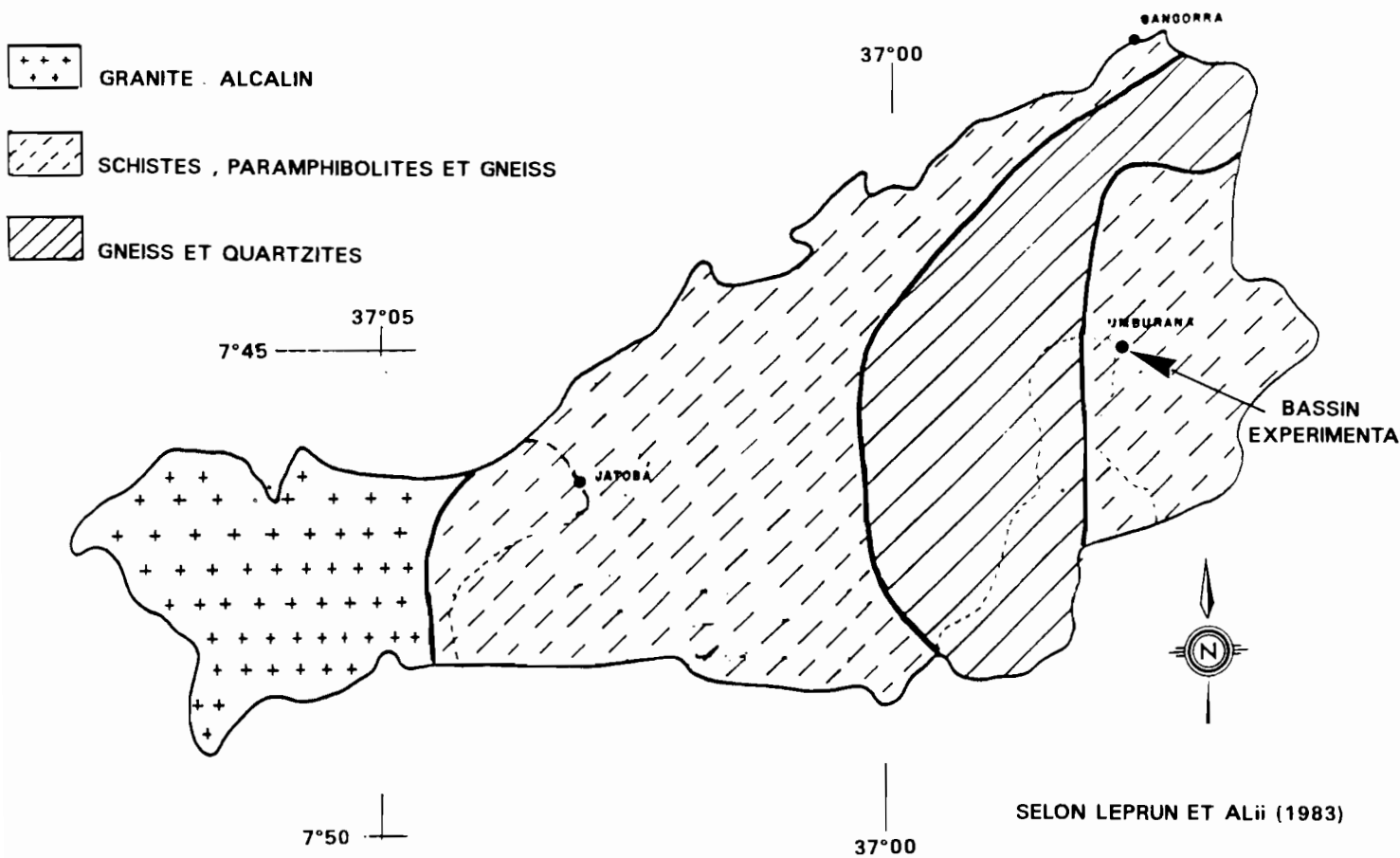


Figure 3.2.1 Esquisse géologique du bassin de SUME

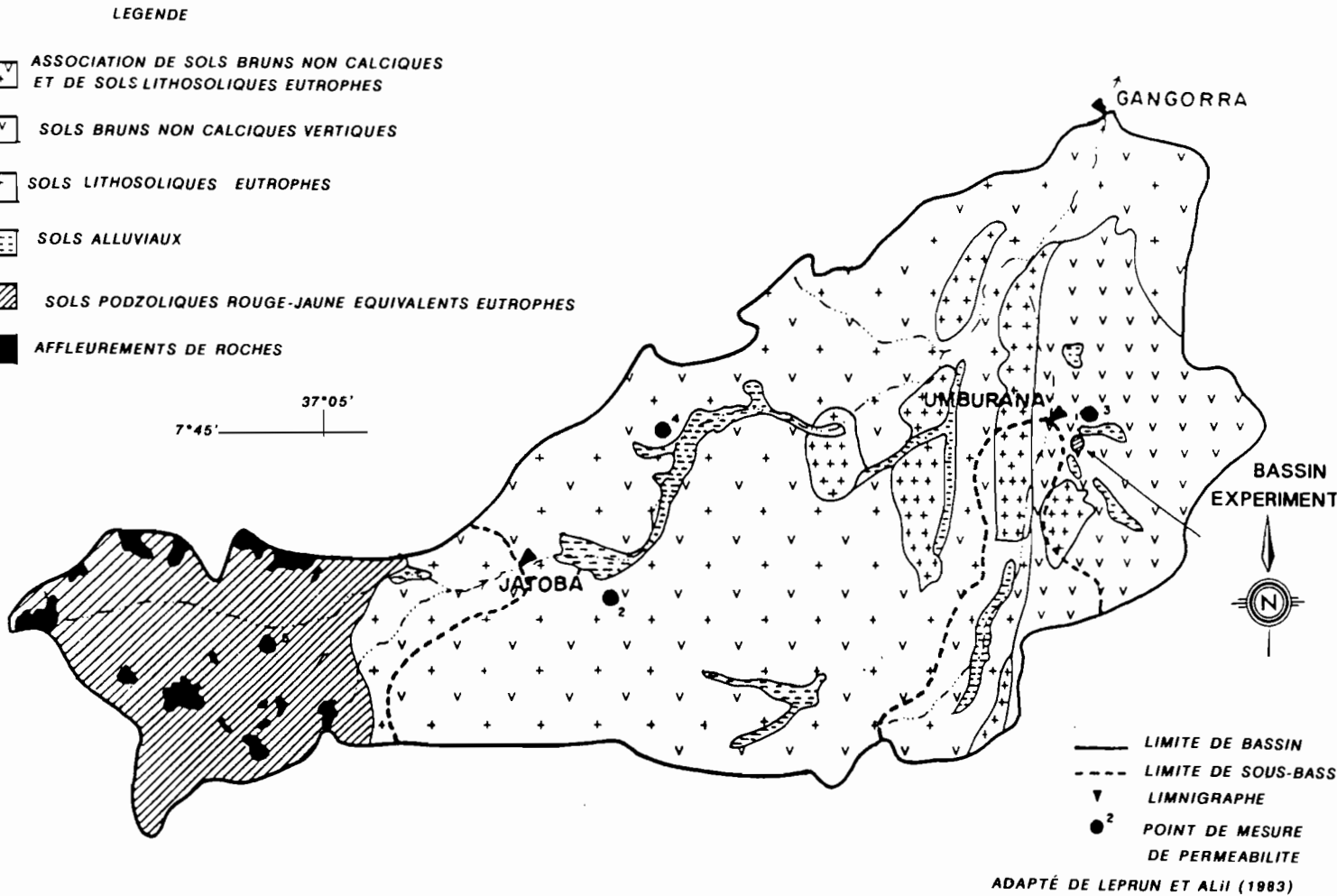


Figure 3.2.2 Carte des sols du bassin de SUME

Complexité et variation des sols et des roches :

Une étude détaillée, menée dans le cadre de l'ATP PIREN, a mis en évidence la très grande complexité et variabilité spatiale des conditions pédologiques et géologiques, qui se répercuteront, évidemment sur les mécanismes hydrologiques.

Le schéma de la figure FF 3.2.3 montre toute la complexité du schéma de distribution des sols et de circulation des solutions le long d'un interfluve de seulement 200 m de long. MOLINIER *et al* (1989a) citent, en fait, trois principaux types de roche classés par "ordre croissant de richesse en bases et ordre décroissant de dureté et de résistance à l'altération":

- des pegmatites quartzites feldspathiques que l'on retrouve souvent sous la forme d'affleurements rocheux près des lignes de crête autour desquelles on rencontre des sols bruns eutrophes peu évolués¹⁵, peu épais et caillouteux ou des lithosols encore moins évolués. Ces sols ne sont

15 Dans la classification pédologique française "Sol Brun Eutrophe peu évolué" correspond à "sol brun non calcique modal" de la classification brésilienne. (SUME)

pratiquement constitués que d'un horizon A de 20 cm d'épaisseur, puis directement d'un horizon C. Ils ont une faible capacité de rétention hydrique ;

- des gneiss à amphiboles qui génèrent des sols bruns non calciques eutrophes tropicaux vertiques présentant, en plus du sol précédent, un horizon B vertique d'environ 50 cm d'épaisseur, argileux, de porosité très fine, présentant à la fois une capacité de rétention hydrique relativement grande et une faible perméabilité quand ils est saturé ;
- des amphibolites qui engendrent des sols bruns eutrophes tropicaux vertiques ou des vertisols dans les dépressions.

Ces différents types de sols auront, évidemment, des comportements hydriques très contrastés. Les changements rapides que l'on constate en quelques mètres et que l'on ne peut que difficilement prévoir avec certitude sans ouvrir une tranchée pour en découvrir l'explication géologique ou pédologique, incitent à une grande prudence quant à l'objectif "d'explication déterministe" des phénomènes visant à rendre opérationnelles des techniques d'extrapolation spatiale.

Le tableau 3.2.1 indique les vitesses d'infiltration au bout de six heures, mesurée par la méthode de Muntz. Chaque valeur correspond à la moyenne de trois essais réalisés sur les sites reportés sur la figure 3.2.2 (source : Leprun *et al* 1983).

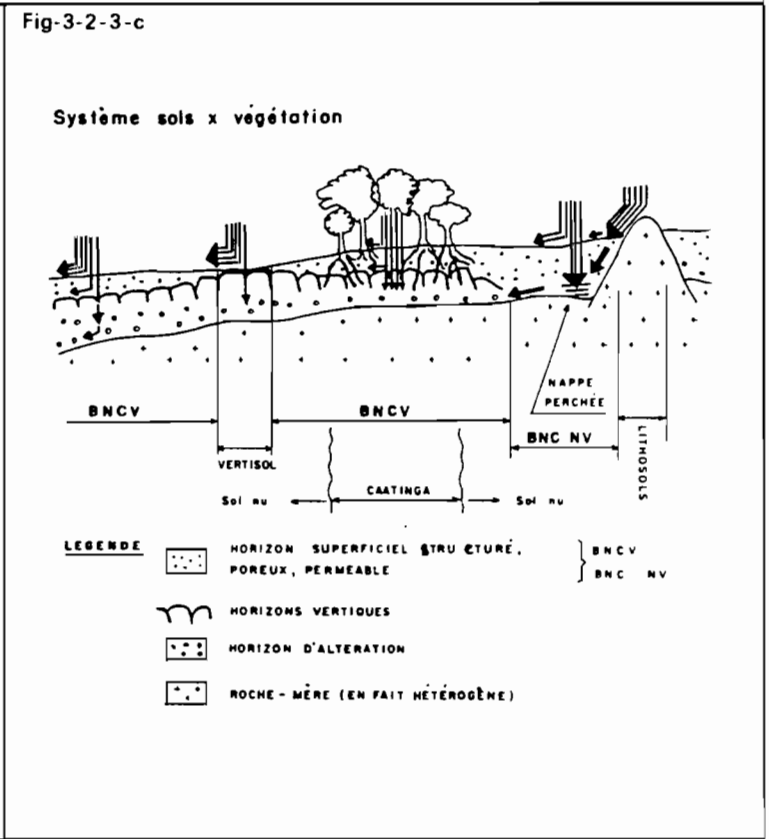
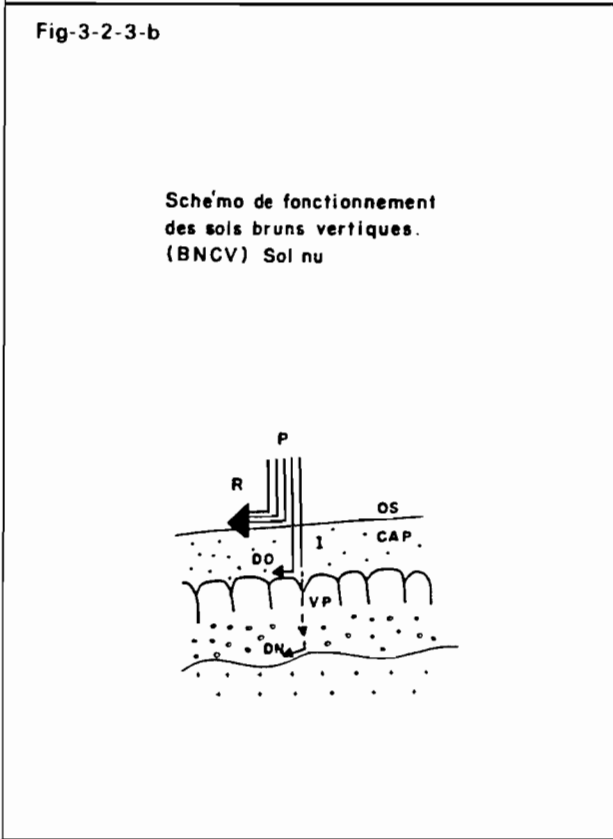
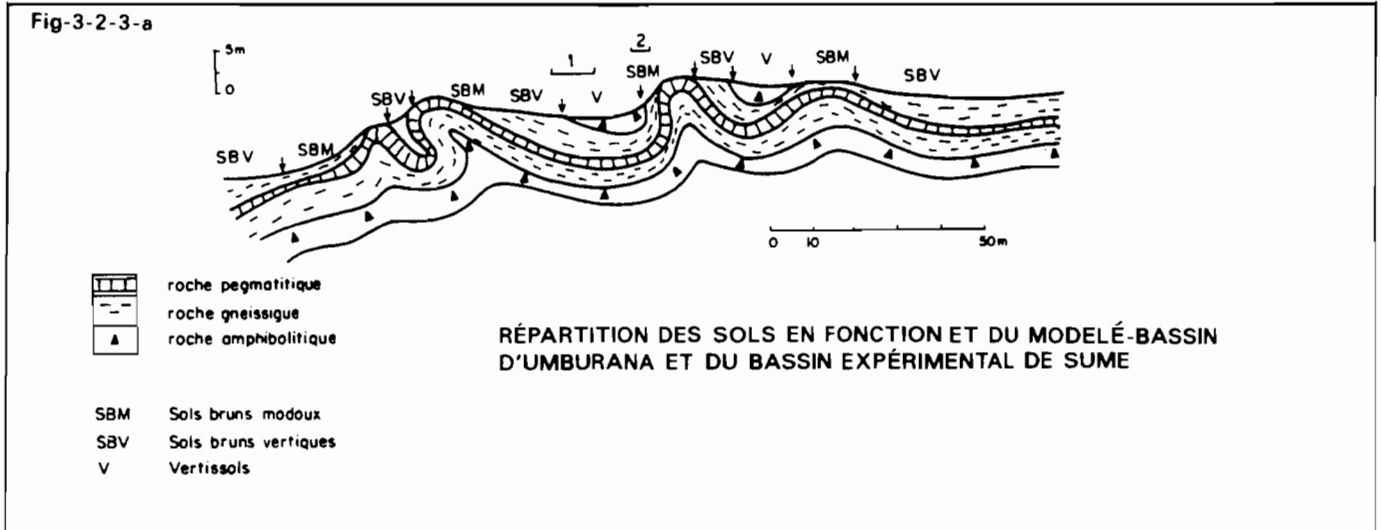
TABLEAU 3.2.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin de SUME. Méthode de Muntz

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES(mm/h)
SU 01	Lithosolique (en transition)	27
SU 02	Brun non calcique sous caatinga peu élevée	34
SU 03	Brun non calcique sous caatinga naturelle	26
SU 04	Lithosolique eutrophe ras	45
SU 05	Podzolique rouge jaune équivalent eutrophe	37

EVOLUTION DES COUVERTURES VEGETALES DU BASSIN DE SUMÉ

Depuis une dizaine d'années on constate, paradoxalement, une évolution aléatoire et rapide des couvertures végétales de la zone métamorphique, qui a pourtant des sols moins profonds, plus caillouteux et hétérogènes. Cette zone avait été jusqu'à présent relativement épargnée, alors que la zone couverte de sols podzoliques, plus peuplée, plus exploitée, était stabilisée depuis longtemps. Ainsi, certains grands propriétaires ont modifié complètement les couvertures végétales de surfaces importantes. Ils ont, par exemple, remplacé la caatinga par des pâturages, des plantations de tomate ou de "palme fourragère" (*Opuntia Sp.*), cactée destinée à l'alimentation du bétail.

Figure 3.2.3 La complexité de la répartition et du fonctionnement des sols du bassin expérimental de SUME (d'après AUDRY ET LEPRUN).



MODIFICATION DU SOL ET DE LA VEGETATION SUR LE BASSIN EXPERIMENTAL DE SUME



Cattinga originelle (L600 = 10mm)



phase 1 - Friche après culture. On voit encore les sillons 1982-1984 (L600 = 67mm)



phase 1 - Friche après culture. On voit encore les sillons 1982-1984 (L600 = 67mm)



phase 2 - On empêche la végétation de repousser 1984-1986 (L600 = 95mm)



phase 3 - Le sol est décapé 1987-1988 (L600 = 180mm)

Les motivations des propriétaires sont diverses :

- dynamisme relatif et récent de cette région¹⁶, dû à la construction nouvelle de bonnes voies d'accès, à la proximité de grands centres urbains consommateurs, à l'existence d'une usine de mise en conserve de tomate et/ou à la croissance de la ville de SUMÉ autour du périmètre d'irrigation du DNOCS ;
- possibilité d'effectuer, en une seule fois, à cause de la taille de leurs propriétés, des mises en valeur de surfaces importantes et d'atteindre ainsi certains seuils de rentabilité. Ces grands propriétaires ont souvent un accès plus facile au crédit et disposent de capital propre.

L'ensemble de bassins expérimentaux installé en 1981 a utilisé les modifications consécutives à une mise en valeur partielle d'une grande propriété, pour y planter de la tomate. Le dispositif de mesure a été conçu pour étudier l'influence de la suppression de la caatinga et de diverses pratiques culturales sur l'écoulement et l'érosion.

Le tableau 3.2.2 montre les liens existants entre certaines caractéristiques physiographiques des bassins étudiés:

TABLEAU 3.2.2 Principales formations géologiques, types de sol et végétation du bassin de SUME

Formation géologique	Granite alcalin		Schiste Gneiss	Paramphibolites quartzites	
Sols engendrés	Affleurement de roche	Sol podzolique rouge jaune Equivalent Eutrophe	Brun non calcique Litho - (vertique ou non vertique)	solique peu épais	Sols alluviaux
Occupation du sol	Sans culture	Très cultivé	Peu cultivé, surtout de la caatinga native		Cultivé
Perméabilité (mm/h)	0	Forte, entre 300 et 400	Faible entre 25 et 40 Capacité de rétention d'environ 60 mm pour les sols vertiques		Forte >500
Pourcentage par Bassin					
GANGORRA	1%	15%	73%	7%	4%
UMBURANA	0%	0%	74%	19%	7%
JATOBÁ	6%	74%	19%		1%

16 Nettement plus grand que dans les régions analogues des bassins de TAUA ou de RIACHO DO NAVIO.

Relief et morphologie

Le tableau 3.2.3 résume les principales caractéristiques morphométriques des trois bassins :

TABLEAU 3.2.3 Caractères morphométriques des trois sous-bassins du bassin de SUME

CARACTERES MORPHOMETRIQUES	GANGORRA	UMBURANA	JATOBA
Taille et forme			
.Surface(km ²)	137,4	10,7	26,8
.Périmètre (km)	69,5	18,2	28,5
.Longueur du rectangle équivalent (km)	30,2	7,65	12,0
.Largeur du rectangle équivalent (km)	4,55	1,40	2,23
.Indice de compacité C	1,66	1,55	1,54
Pente et Relief:			
.Classe de relief	R ₃	R ₃	R ₃
.Altitude moyenne (m)	590	590	650
.Indice global de pente (m/km)	3,9	6,8	9,3
.Dénivelée spécifique (m)	46	26	48
Réseau de drainage:			
.Densité de drainage (km/km ²)	2,3	1,9	1,3
.Rapport de Longueur R1	2,2	-	2,6
.Rapport de confluence Rc	4,5	4,5	3,2

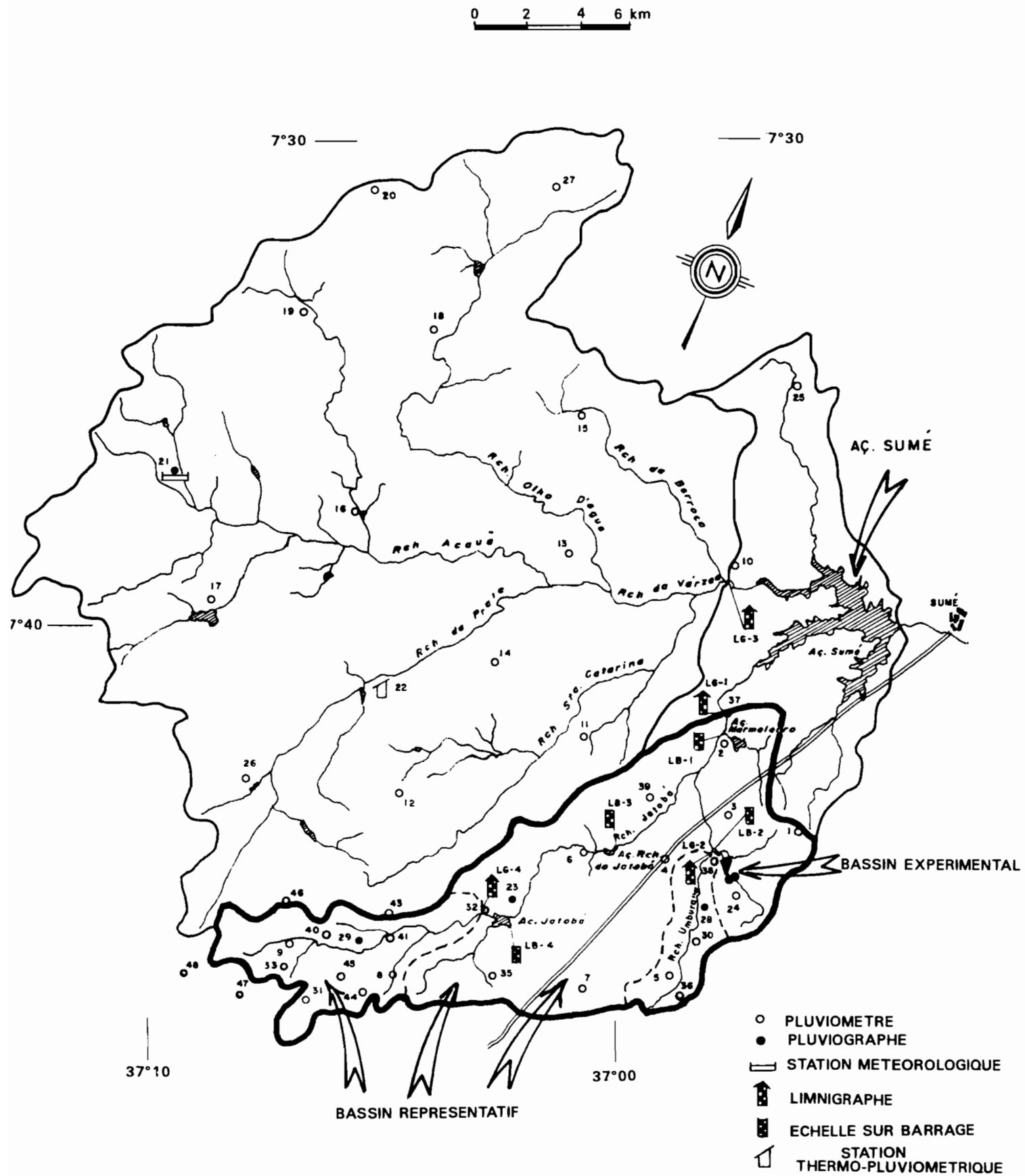
3.2.3 Dispositif de mesure installé.

Les figures 3.2.4 à 3.2.6 montrent l'ensemble du dispositif de mesure installé sur le bassin représentatif et le bassin expérimental.

3.2.3.1 Bassin représentatif: 1974-1989

Les données du bassin représentatif sont en général de qualité médiocre pour les raisons suivantes: difficultés à trouver des observateurs compétents ou sérieux, instabilité des lits, en particulier pour la station d'UMBURANA, difficultés d'accès et de jaugeages en hautes eaux (les crues survenant souvent la nuit), contrôles trop rares des limnigraphes. Les années antérieures à 1975 sont inexploitable; la période 1976-81 est utilisable; en 1982 et 1983, les rivières n'ont pratiquement pas coulé et l'on constate, après 1984 une baisse très nette de la qualité des informations recueillies sur le terrain. Il n'a malheureusement pas été possible d'exploiter systématiquement, comme à TAUA, les données limnimétriques d'un ensemble d'açudes, car les açudes de SUME sont moins nombreux et leurs bassins ont des couvertures végétales plus complexes et moins faciles à définir d'une manière simple. De plus, la plupart de ces açudes ont des bassins emboîtés les uns dans les autres, ce qui complique l'interprétation de leur comportement. La surface moyenne contrôlée par pluviomètre est de 3,8 km².

Figure 3.2.4 Réseau de mesure de l'açude SUME



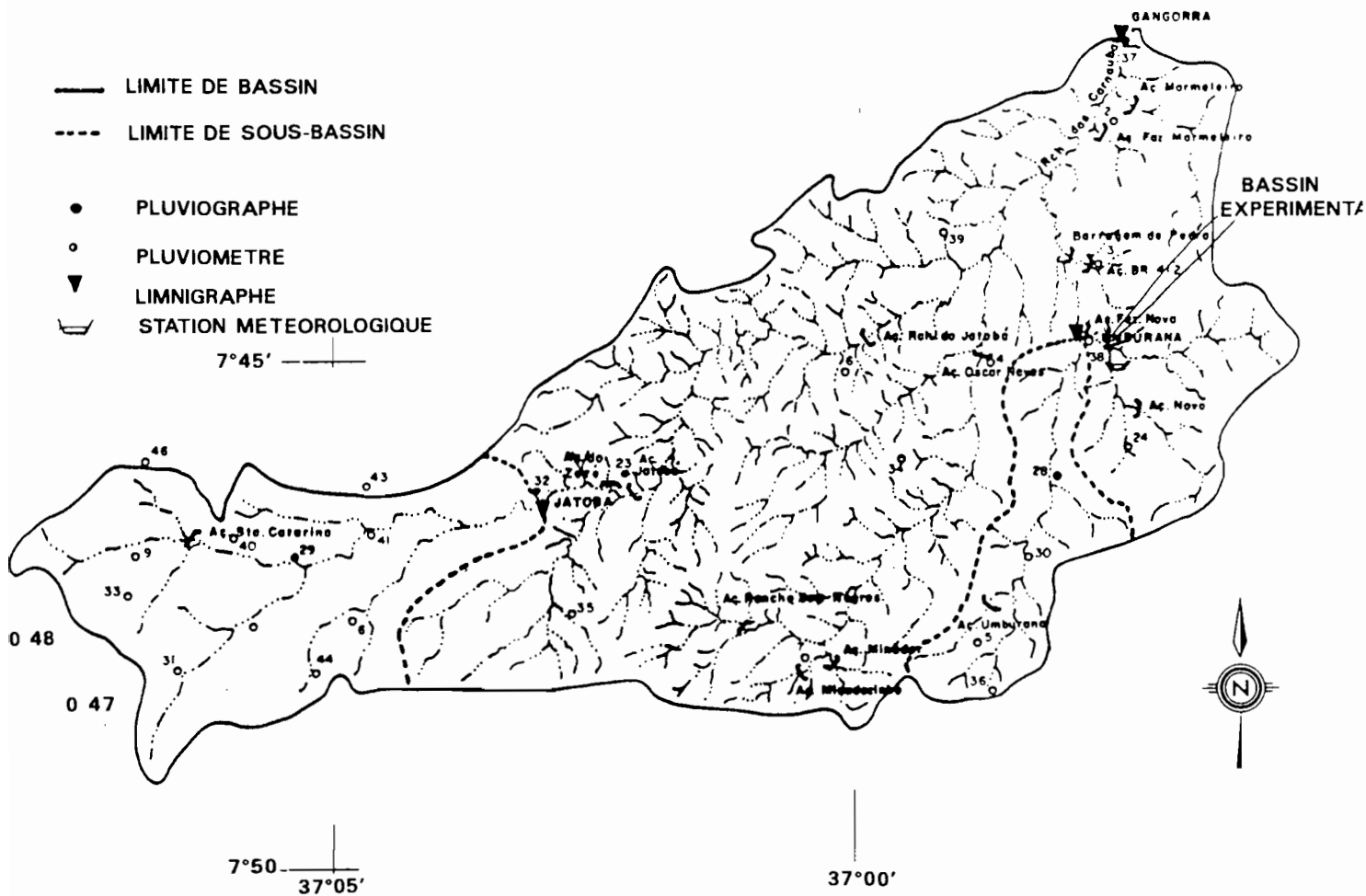


Figure 3.2.5 Réseau hydropluviométrique et hydrologique du BVR de SUME

3.2.3.2 Bassin Expérimental: 1981-1990

■ Le dispositif a été installé pour mettre en évidence l'influence du couvert végétal en suivant les principes suivants:

- Assurer le suivi hydrologique et sédimentologique de deux paires de micro-bassins de 0,5 à 1 ha de surface, les deux premiers couverts de végétation naturelle, les deux autres sans végétation.
- Maintenir sur un certain nombre de parcelles des conditions les plus proches possibles des micro-bassins précédents. Utiliser les autres parcelles pour tester librement diverses couvertures végétales et/ou pratiques culturales.

■ Les sols dominants sont des sols bruns non calciques vertiques (sols bruns eutrophes à caractère vertique associés à sols lithossoliques et à des vertiques).

■ Les pentes varient entre 4 et 9 %.

■ Les couvertures végétales testées sont les suivantes:

- **Caatinga naturelle**, décrite par FOTIUS, (1983), qui assure une très bonne protection du sol et dont la hauteur maximum varie entre 3 et 6 m (micro-bassin 1 et 2 et parcelle 5).
- **Zones sans végétation** (micro-bassins 1, 2, et parcelles 4 et 6). En fait, plusieurs modes de défrichage et de gestion du sol se sont succédés, ce qui a permis de tester différents cas:
 - . Entre 1982 et 1984 les zones dites "sans végétation" étaient recouvertes d'une jachère consécutive à l'abandon de la culture de tomate en billons selon les courbes de niveau utilisés pour amener l'eau d'irrigation. Ces billons se sont progressivement estompés au fil des années. Les années 1982 et 83 ayant été très sèches, cette jachère n'a pratiquement pas poussé. Les premières pluies de 84 ont littéralement provoqué une explosion de la végétation arbustive régénératrice de la caatinga primitive, rendant ainsi les zones dites "sans végétation" complètement couvertes de pousses d'arbustes drues, touffues et denses.
 - . A partir de 1985, un contrôle rigoureux de ce couvert végétal s'est concrétisé par un nettoyage systématique du sol nu pour reproduire les conditions d'érosion maximum recommandées par WISCHMEIER.
 - . Au bout de quelques temps, et surtout à partir de 1987, on a observé un décapage impressionnant des premières couches du sol, ce qui s'est traduit par une augmentation très nette des écoulements et des émergences de pierres et de roches.
- D'autres couvertures végétales ont été testées sur les parcelles:
 - . cultures de palmes fourragères avec billons tracés, soit selon les courbes de niveau, soit dans le sens de la pente (parcelles 6 et 7);
 - . repousse sur plusieurs années de la caatinga, après sa destruction (parcelles 8 et 9);
 - . essais de maintien, sur plusieurs années, d'un tapis herbacé dense, de 25 cm de hauteur maximum (parcelles 2 et 3).

Le dispositif de mesure décrit par CADIER *et al* (1983) est constitué des équipements suivants:

- **Pour les microbassins:** (voir figure 3.2.6) une fosse à sédiment, de 1 m de large et de 3,25 m de long, équipée d'un déversoir triangulaire, à mince paroi de 90° d'ouverture. Ce déversoir commence à couler quand le niveau de l'eau atteint 80 cm au dessus du fond de la fosse. Le niveau de l'eau dans ces fosses est suivi par deux limnigraphes, l'un fonctionnant en permanence et l'autre beaucoup plus rapide, et précis, doit être mis en marche au début de chaque crue. Les fosses piègent les sédiments les plus grossiers; il est nécessaire d'échantillonner manuellement les sédiments en suspension contenus dans les déversements. Le débit maximum du déversoir est de 270 l/s.
- **Pour les parcelles de 100 m²** (selon les normes de WISCHMEIER et SMITH, 1978), deux réservoirs en fibrociment de 1000 litres séparés par un partiteur qui permet de recueillir dans la deuxième fosse le neuvième des écoulements sortant de la première (voir figure 3.2.6).

Les mesures des écoulements se font par la lecture directe d'échelles graduées en mm, dont les valeurs sont traduites en volumes et celles des transports solides par un protocole d'échantillonnage du mélange eau-sédiment recueilli. Il faut, bien sûr, multiplier par 9 ce que l'on mesure dans la deuxième fosse en aval du partiteur.

Ce dispositif de mesure a fonctionné dès son installation de manière satisfaisante, grâce à la présence permanente d'un technicien. On a rapidement pu mettre en évidence des différences de comportement significatives. Les plus gros problèmes rencontrés sont relatifs au contrôle de l'homogénéité et de la reproductibilité des caractéristiques de la couverture végétale (la végétation ayant la mauvaise habitude de croître ou de perdre ses feuilles inopportunément...). Il est, par ailleurs, arrivé une ou deux fois, que les plus fortes crues des microbassins et parcelles sur sols nu, aient engorgé ou submergé de boue les dispositifs de piégeage de sédiments.

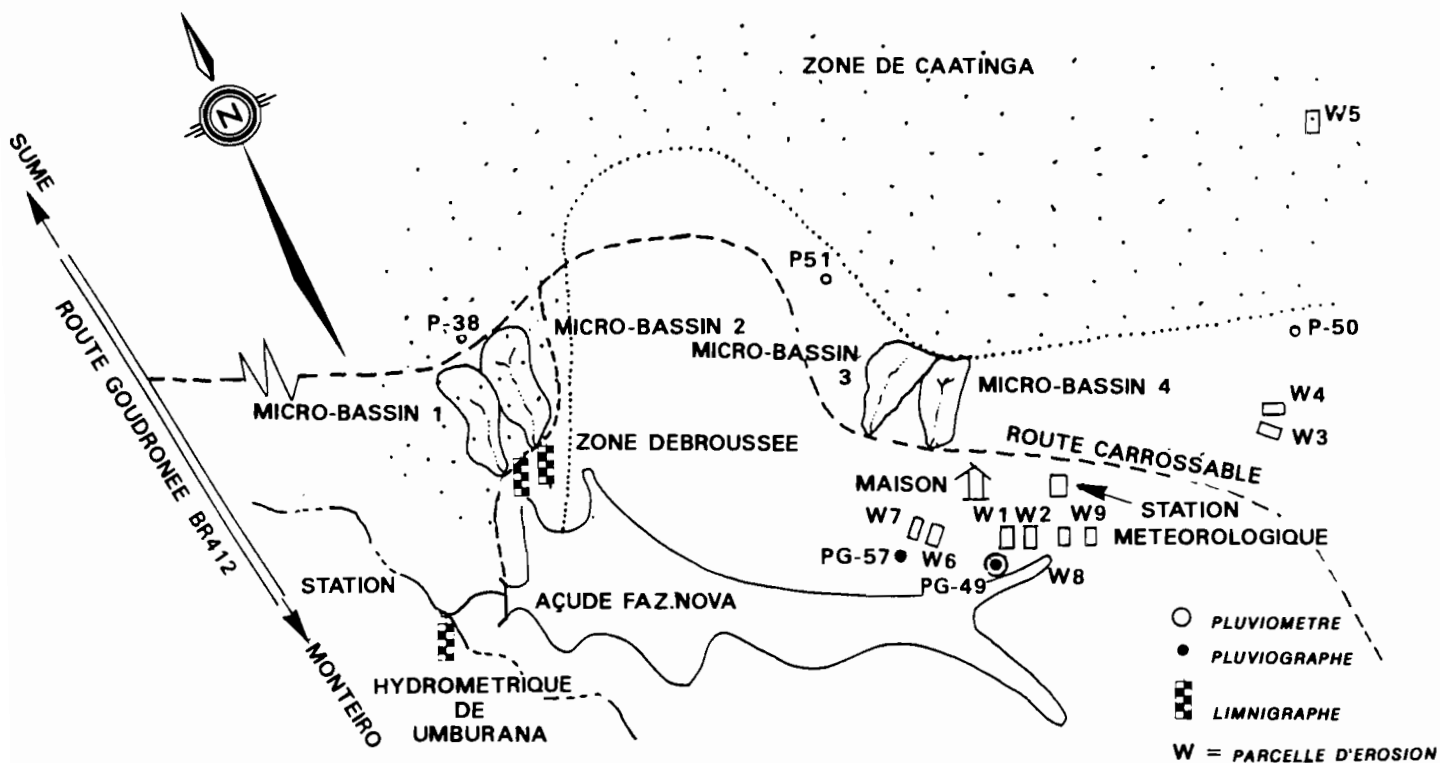


Figure 3.2.6 Croquis de situation du bassin expérimental de SUME

BASSIN EXPERIMENTAL DE SUME

DIVERSITE DES MESURES REALISEES



Une fosse à sédiment



Etalonnage du partiteur



Les parcelles en batterie



Comment recueillir les faibles écoulements



l'A.T.P - Les tensiomètres



l'A.T.P - Simulation de pluie



Mesure volumétrique en basses eaux à la station principale de Gangorra

AUTRES DISPOSITIFS DE MESURE



Simulateur de pluie type "swanson" sur le bassin du Riacho do Navio



Autres dispositifs de partition d'eau



Batterie de parcelles d'érosion à Alagoinha (pb) (Installée en 1944)



Autres dispositifs de partition d'eau

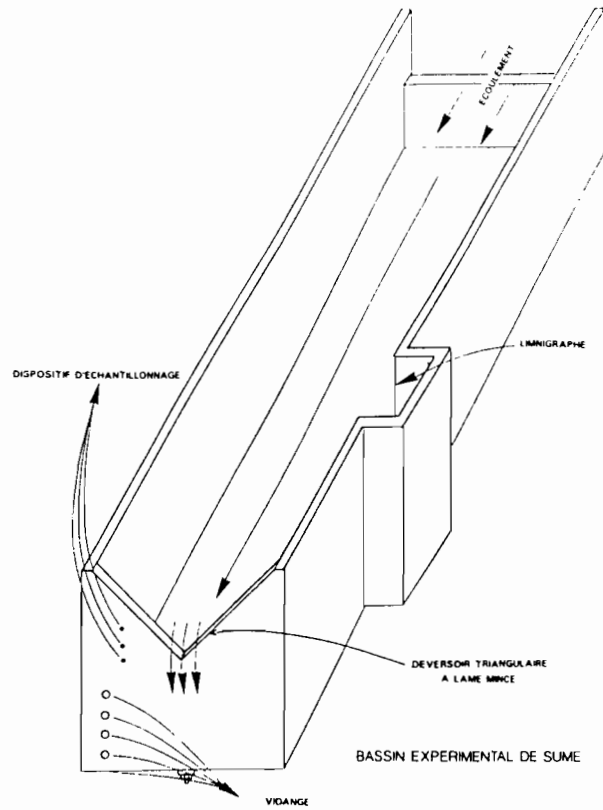


Figure 3.2.7 Fosse à sédiment des micro-bassins

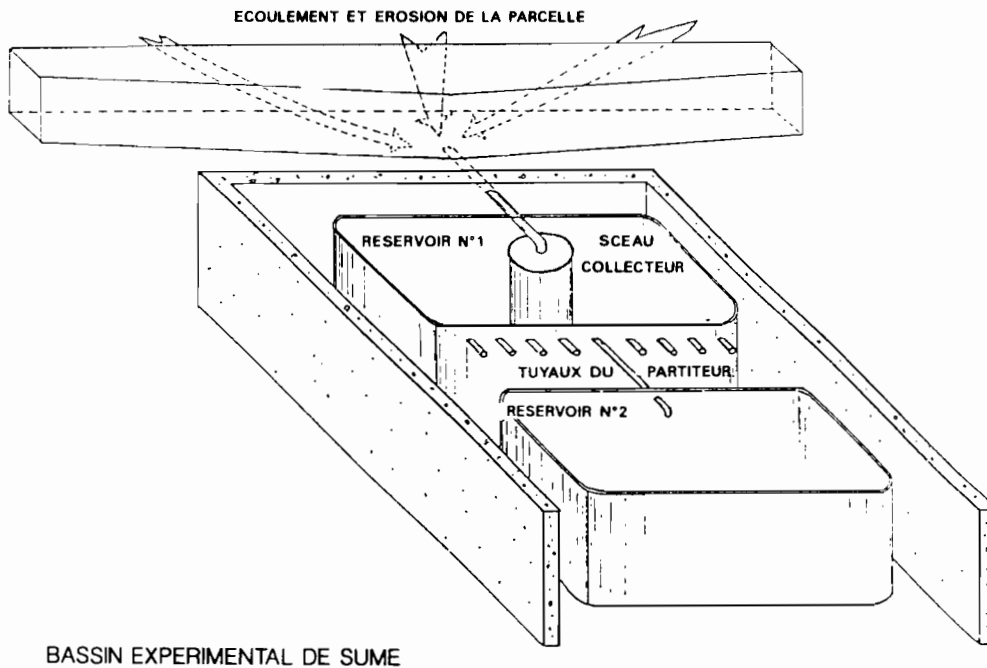


Figure 3.2.8 Réservoirs collecteurs des parcelles de WISHMEIER

3.2.3.3 Action Thématique Programmée ORSTOM/CNRS/SUDENE/UFPB

Des mesures et une analyse beaucoup plus fines des mécanismes régissant l'hydrologie de cet ensemble de "bassins expérimentaux" ont été entreprises entre 1986 et 1989 dans le cadre d'une Action Thématique Programmée (A.T.P.) du programme PIREN bénéficiant d'un financement CNRS-ORSTOM. L'objectif de cette recherche était d'étudier la "dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien" ainsi que "les conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale"

Des techniques de mesure nouvelles, telles que la simulation de pluie, l'emploi de tensiomètres et de sondes à neutrons ont été introduites pour réaliser des campagnes de mesures intensives des flux hydriques et chimiques à l'échelle du profil pédologique ou de la portion d'interfluve. Ces mesures ont mis rapidement en évidence un certain nombre de comportements hydrodynamiques inattendus qui reflétaient une réalité plus complexe que ne le prévoient les schémas initiaux. La figure 3.2.3 illustre bien notre propos. Des mesures des caractéristiques hydrodynamiques des sols et des variations de la charge chimique de l'eau sur des monolithes et sur des positions judicieusement choisies le long des toposéquences, ont permis de mieux comprendre les fonctionnements hydriques à l'échelle de l'interfluve et de définir ainsi, certaines conditions de transposition spatiale de résultats.

3.2.4 Résultats obtenus sur l'ensemble du dispositif:

Chronique des lames écoulées

Le tableau 3.2.4 résume la chronique des lames écoulées et précipitées sur les différents sous-bassins.

Nous constatons, une fois de plus, l'extrême irrégularité des écoulements.

D'une année à l'autre tout d'abord: les écoulements de la seule année 1985 sont comparables à la somme de tous les autres écoulements. Les écoulements du bassin d'UMBURANA ont été nuls en 1980, 83 et 87. L'irrégularité de ce bassin semble la plus forte.

D'un bassin à l'autre, ensuite. Les lames des microbassins 3 et 4 sont bien supérieures à celles des autres et surtout à celle des microbassins 1 et 2. Les lames moyennes des grands bassins sont proches, mais, certaines années, les différences sont grandes. Cette variabilité montre la nécessité d'observer de longues séries ou d'homogénéiser les données. Une analyse de la seule année 1977 conduirait, par exemple, à estimer une valeur trois fois plus forte pour UMBURANA que pour JATOBA, à l'inverse de ce que l'on pourrait conclure au vu des seuls résultats de l'année 1984.

Rappelons enfin que les données des trois grands bassins sont de qualité médiocre. Ceci est surtout vrai pour le bassin d'UMBURANA dont le lit n'a pas été stabilisé. Il faudra donc considérer avec une certaine réserve leurs résultats.

TABLEAU 3.2.4 Chronique des lames écoulées du bassin de SUME (mm)

A N	PLUV.	BASSIN			PLUV.	MICRO-BASSIN			
		GANGORRA	JATOBA	UMBURANA		MB1	MB2	MB3	MB4
75	907,2	-	68.44						
76	581,1	9.6	11.1	10.5	-	-	-	-	-
77	816,9	68.7	22.3	69.7	-	-	-	-	-
78	716,4	34.8	72.0	57.3	-	-	-	-	-
79	483,7	2.7	13.2	2.9	-	-	-	-	-
80	361,5	0.2	11.7	0.0	-	-	-	-	-
81	598,0	80.9	121.5	125.6	-	-	-	-	-
82	377,9	2.2	13.1	17.0	307,7	0.8	0.8	21.0	15.7
83	328,0	0.6	2.1	0.0	247,8	0.0	0.0	2.1	0.5
84	764,8	32.4	122.5	76.7	714,3	5.1	18.2	89.2	42.1
85	1383,4	259.8	351.7	398.1	1438,2	67.9	211.0	468.9	383.7
86	1049,8	81.1	95.7	168.3	994,9	31.8	59.8	301.6	270.6
87	454,2	1.6	2.0	0.0	407,2	0.1	0.1	84.5	52.1
88	628,5	3.9	4.8	28.7	761,9	0.6	2.1	273.5	247.0
Moy 75/88	675,1	41,3	65,2	68,2					
Moy 82/88	712,4	54,5	84,5	98,4	696,0	15,2	41,7	177,3	144,5
L600		31,4	37	36		6,7	12,7	66 à 195	66 à 163

Caractéristiques des crues

Le tableau 3.2.5 résume les caractéristiques des crues des trois sous-bassins équipés de limnigraphes, en reprenant les conventions exposées pour le bassin de TAUA.

TABLEAU 3.2.5 Caractéristiques des crues du bassin de SUME

Bassin	Surface	Hydrogramme unitaire					
		Temps de monté	Temps de base	Débit maxi pour Ls=1mm	X10 mm	Kx moy	Q10 m3/s
Gangorra	137 km2	2h30	8h	15,0	19	6,37	121,0
Jatobá	26,8 km2	1h40	5h30	3,0	26	2,22	58,0
Umburana	10,7 km2	1h10	5h	1,6	32	0,81	26,0

Lames écoulées caractéristiques

Le tableau 3.2.6 montre les variations des différentes lames écoulées caractéristiques.

TABLEAU 3.2.6 Lames écoulées caractéristiques du bassin de SUME (mm)

E C O U L E M E N T S									
BASSIN	L ₆₀₀	DECEN. HUM. LA01	TRIEH. HUM. LA033	MEDIAN LA05	TRIEH. SEC LA067	DECEN. SEC LA09	L(3AC)	CRUE DECEN. X10	COEF. ECOUL. (%)
Gangorra (137 km ²)	31	74	34	19	8	(1)	17	19	5.2
Jatoba (26,8 km ²)	37	88	40	23	10	(2)	19	26	6,0
Umburana (10,7 km ²)	36	102	46	26	11	(3)	21	32	6,0
Microbassins avec caatinga:									
Microbassin 1	6,7	19	6	2,4	0	0	0,8	12	1,1
Microbassin 2	12,7	36	6	2,1	0	0	0,4	25	2,1
Moyenne Microbassin 1 et 2	9,7	28	6	2,3	0	0	0,6	19	1,6
Microbassins sans végétation:									
Microbassin 3 période 1982-84	66	148	80	52	26	6	49	45	11
Microbassin 4 période 1982-84	66	158	81	48	22	4	47	46	11
Moyenne micro 3 et 4, période 82-84	66	153	81	50	24	5	48	46	11
Microbassin 3 période 1984-86	114	220	139	102	62	24	126	57	19
Microbassin 4 période 1984-86	80	171	95	65	35	12	63	51	13
Moyenne micro 3 et 4, période 84-86	97	196	117	84	49	18	95	54	16
Microbassin 3 période 1987-88	195	326	233	179	145	85	322	62	33
Microbassin 4 période 1987-88	163	294	199	148	109	53	232	60	27
Moyenne micro 3 et 4, période 87-88	179	310	216	164	127	69	277	61	30

Voir définitions et explications données pour le bassin de TAUA

3.2.5 Conclusions: les acquis du bassin de SUME:

Les valeurs et les variations des lames écoulées du tableau 3.2.6 sont très instructives et permettent d'avancer un certain nombre d'hypothèses et de conclusions nouvelles sur la quantification de l'influence du couvert végétal sur les écoulements. Il s'agit là d'une information quantitative inédite et nouvelle dans le Nordeste, qui constitue, sans doute, la contribution la plus importante apportée par le bassin de SUMÉ à l'hydrologie de cette région. Elle apporte quelques éléments objectifs de réponse aux questions très actuelles sur les conséquences hydrologiques de l'antropisation.

3.2.5.1 Variation des lames écoulées en fonction de la végétation

L'influence de la végétation et de l'érosion du sol sur les écoulements nous semble largement significative. Nous l'avons résumée dans le tableau 3.2.7.

TABLEAU 3.2.7 Evolution des écoulements en fonction du sol et de la couverture végétale du bassin de SUME

Période	Sol et couverture végétale	L600 moyen	Erreur PROBABLE
1982-89			
Micro-bassins 1 et 2	Caatinga très bien conservée	9,7 mm	+ 60% ou + 6 mm
1982-83			
Micro-bassins 3 et 4 phase 1	Dénudé, cultivé en courbe de niveau en laissant le sol se tasser; faible croissance de la végétation, car ces années sont déficitaires.	66 mm	+ 30% ou + 20 mm
1984-86			
Micro-bassins 3 et 4 phase 2	Les billons s'estompent; on arrache toute nouvelle pousse de végétation	97 mm	+ 30% ou + 25 mm
1987-88			
Micro bassins 3 et 4 phase 3	Les billons ont disparu, les horizons supérieurs du sol ont été décapés l'horizon (B) argileux et les pierres affleurent. Les écoulements augmentent considérablement.	179 mm	+ 20% ou + 35 mm

On constate que l'élimination de la caatinga provoque au début un accroissement d'un facteur multiplicatif de 6 à 7 des écoulements moyens annuels.

Au bout de quelques années, les premiers décimètres du sol ayant été érodés, les écoulements annuels seront de nouveau multipliés par 3, ce qui correspond à un **accroissement total d'un facteur de 20** par rapport à l'écoulement du bassin original protégé par son couvert de caatinga.

3.2.5.2 Variations des écoulements entre micro-bassins semblables

Nous constatons, tout d'abord, que les variations de lames écoulées sont importantes à l'intérieur de chaque paire de bassins dits "jumeaux", dont les couvertures végétales ont été "traitées" de manière identique et pour lesquels on pourrait s'attendre à de plus faibles différences.

Ainsi les lames écoulées doublent pratiquement entre les deux microbassins jumeaux 1 et 2 sous caatinga naturelle.

Ces différences sont encore de l'ordre de 20 à 30 % sur les bassins débroussés contigus qui présentent des écoulements bien supérieurs.

Ces écarts montrent que de grandes différences peuvent survenir entre deux petits bassins apparemment semblables et sont à rapprocher de la complexité des toposéquences mise en évidence par l'étude ATP-PIREN. Ceci doit inciter à la plus grande prudence quant à la portée des résultats numériques que nous présentons et à leur validité pour l'extrapolation. Nous sommes en effet dans l'impossibilité pratique d'estimer sérieusement l'intervalle de confiance de ces mesures, puisque nous ne possédons malheureusement que des échantillons de deux individus pour chaque population de bassin étudié. Rappelons que l'augmentation de cette population est coûteuse et requiert des années d'observations de terrain.

3.2.5.3 Lames écoulées sur les Bassins Représentatifs

Les lames écoulées des trois bassins d'UMBURANA, JATOBA et GANGORRA sont faibles pour des bassins situés sur socle cristallin.

La lame écoulée L_{600} du bassin d'UMBURANA est de 36 mm. L'analyse des chroniques des lames annuelles montre une forte irrégularité. Deux caractéristiques peuvent expliquer cela:

- Une grande partie du bassin est composée de sols bruns non calciques vertiques, avec une couverture végétale formée de caatinga bien conservée et donc proche des microbassins 1 et 2, mais avec par endroit une zone cultivée.
- Les fonds des vallées sont couverts de dépôts alluviaux importants, qui représentent 7 % de la surface totale du bassin et bordent les principaux cours d'eau. Ces zones doivent intercepter une fraction importante des écoulements en provenance des versants, surtout en début de saison des pluies et pendant les années de sécheresse. Ceci doit bien sûr diminuer les écoulements moyens, mais aussi accentuer l'irrégularité du régime de ce bassin ($X_{10}/L_{600} = 0,9$ par exemple).

La faiblesse et l'irrégularité des écoulements de UMBURANA peut, à notre avis, parfaitement être expliquée par ces considérations, qui montrent pourquoi ce bassin présente à la fois des écoulements faibles et irréguliers, mais aussi des crues dangereuses.

Le bassin de JATOBA présente des écoulements comparables à ceux d'UMBURANA ($L_{600} = 37$ mm), mais la chronique des lames observées indique une régularité supérieure à celle du bassin précédent ($X_{10}/L_{600} = 0,7$). Aucune année n'a été totalement dépourvue d'écoulement.

Ce bassin, bien que couvert à 74 % par des sols podzoliques relativement épais, sableux et perméables, avec un réseau hydrographique très peu dense, comporte des affleurements rocheux notables (6 % du bassin). De plus, ses zones alluviales sont moins importantes que celles d'UMBURANA.

Il semble donc que ce sont les quelques zones montagneuses couvertes de rochers et la faiblesse des zones alluviales de ce bassin qui assurent les écoulements de ce bassin.

Quant au bassin de GANGORRA (137 km², $L_{600} = 31$ mm, $X_{10}/L_{600} = 0,6$), on peut estimer qu'il est composé aux deux-tiers ou au trois-quarts de bassins semblables à UMBURANA, le reste s'apparentant plutôt à JATOBA. Les valeurs des lames écoulées observées reflètent globalement ces proportions.

L'analyse des écoulements reçus par le grand açude SUMÉ, situé en aval, n'a malheureusement pas pu être effectuée.

3.3 LE BASSIN REPRESENTATIF DU RIACHO DO NAVIO

Le bassin du RIACHO DO NAVIO est le plus ancien des bassins installés par le programme de bassins représentatifs. La grande taille et la complexité de ce bassin rend délicate l'interprétation de ses résultats. On y montre que les zones couvertes de régosols ne produisent pas beaucoup d'écoulement, mais on y a surtout montré qu'il était nécessaire d'observer des bassins plus petits et plus homogènes. Les termes du bilan de l'açude CONCEIÇÃO ont été analysés sur une longue période. L'analyse du fonctionnement de cet açude permet de proposer une formule de calcul de l'évaporation des açudes à partir de l'évaporation mesurée sur bac.

3.3.1 Historique et description du bassin

Le réseau hydropluviométrique du Bassin Représentatif du RIACHO DO NAVIO a été implanté et géré par la SUDENE. Il a fonctionné entre Juillet 1970 et Septembre 1977.

Sur les cinq bassins installés, trois ont fourni des données de qualité suffisante pour permettre une interprétation: SALOBRO (15,6 km²), OSCAR BARROS (45 km²) et MATRIZ (468 km²).

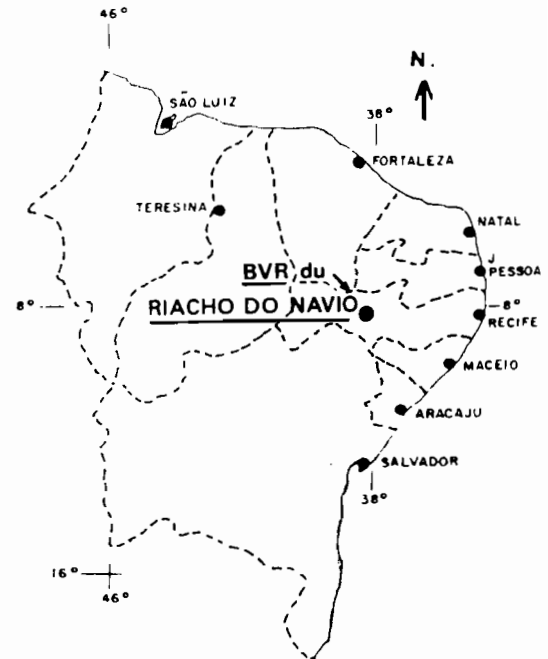
Installé avant la planification réalisée par NOUVELOT(1974), le BVR du RIACHO DO NAVIO se trouve dans la zone homogène H₂, P₁, R₅, A₁₋₂, dont nous rappelons les caractéristiques:

- H₂: Précipitation annuelle entre 400 et 600mm.
- P₁: Sous sol imperméable.
- R₅: Relief assez fort.
- A₁₋₂: Altitude inférieure à 800m.

Ce bassin a fait l'objet d'un rapport pédologique (GOMES et SANTOS, 1977), d'un rapport hydrologique de synthèse préliminaire (NOUVELOT et FERREIRA, 1977) et d'un rapport hydrologique final (NOUVELOT *et al*, 1979). Une première synthèse et modélisation des données de ce bassin ont été effectuées par CAMPELLO (1979). Nous avons extrait de ces deux derniers ouvrages une grande partie des informations que nous présentons.

Climat, pluviométrie

Situé dans la partie la plus basse et la plus aride du Sertão do PAJEU, au centre de l'Etat du Pernambouc, à environ 300 km à vol d'oiseau de la côte Atlantique, ce bassin est caractérisé par une pluviométrie faible et irrégulière. Sa hauteur annuelle moyenne y varie entre 550 et 500 mm, le petit bassin de SALOBRO, situé le plus au Nord, étant le plus arrosé. Les coefficients de variation de la distribution des totaux annuels sont



voisins de 0,40 ; les valeurs décennales sèches et humides étant respectivement de l'ordre de 300 et de 850 mm.

Comme dans toute cette partie du Sertão Nord l'essentiel des précipitations tombe entre les mois de janvier et mai, le mois de mars étant le plus abondant.

L'analyse des chroniques des intensités de diverses durées montre que cette région se situe dans la moyenne du Sertao Nord, avec, par exemple, des totaux en 24 h de fréquence annuelle de 59 mm, et décennale de 103 mm, des intensités décennales de 63 mm/h en 1 heure et de 122 mm/h en 10 minutes.

Les variations de la température sont faibles. La moyenne annuelle se situe autour de 25°C avec un maximum en novembre et un minimum en août. La moyenne mensuelle des maximums varie entre 35 et 28°C et celle des minimums entre 17 et 21°.

L'humidité de l'air atteint son maximum à la fin de la période des pluies en avril-mai et son minimum en septembre.

Les vents sont généralement faibles, avec une direction prépondérante du secteur sud-est.

L'insolation moyenne varie entre 6 h par jour en juin-juillet et 9 h en octobre.

L'évaporation mesurée sur bac de classe A atteint son maximum en octobre-novembre (9 à 10 mm par jour), mais devient inférieure à 6 mm par jour en mai-juin. Les totaux annuels évaporés varient entre 2500 et 3000 mm.

Géologie, sols et végétation

Ce bassin se trouve sur le socle cristallin précambrien et est donc malheureusement dépourvu de formation aquifère généralisée.

Dans sa partie occidentale et sur le petit bassin de SALOBRO, on rencontre surtout des migmatites, micaschistes et des paragneiss qui engendrent des regosols eutrophes peu épais. Dans le reste du bassin on trouve, le plus souvent, un granite intrusif qui favorise le développement de sols lithosoliques, de régosols profonds et de planosols.(voir figures 3.3.1 à 3.3.3).

Le tableau 3.3.1 indique les vitesses d'infiltration au bout de six heures, mesurée par la méthode de Muntz. Chaque valeur correspond à la moyenne de trois essais réalisés sur les sites reportés sur la figure 3.3.3 (source : LEPRUN *et al* 1983).

TABLEAU 3.3.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin du RIACHO DO NAVIO. Méthode de Muntz

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES (mm/h)
RN 01	Lithosolique eutrophe avec A faible	86
RN 02	Régosol indiscriminé	86
RN 03	Régosol eutrophe	101
RN 04	Régosol eutrophe profond	145
RN 05	Régosol eutrophe peu épais	35
RN 06	Lithosolique profond	173
RN 07	Planosol solodisé	73
RN 08	Planosol solodisé	72
RN 10	Brun non calcique	28
RN 11	Lithosolique indiscriminé	106

La répartition complexe des sols et des couvertures végétales obéit au schéma du TABLEAU 3.3.2 adapté de LEPRUN *et al* (1983).

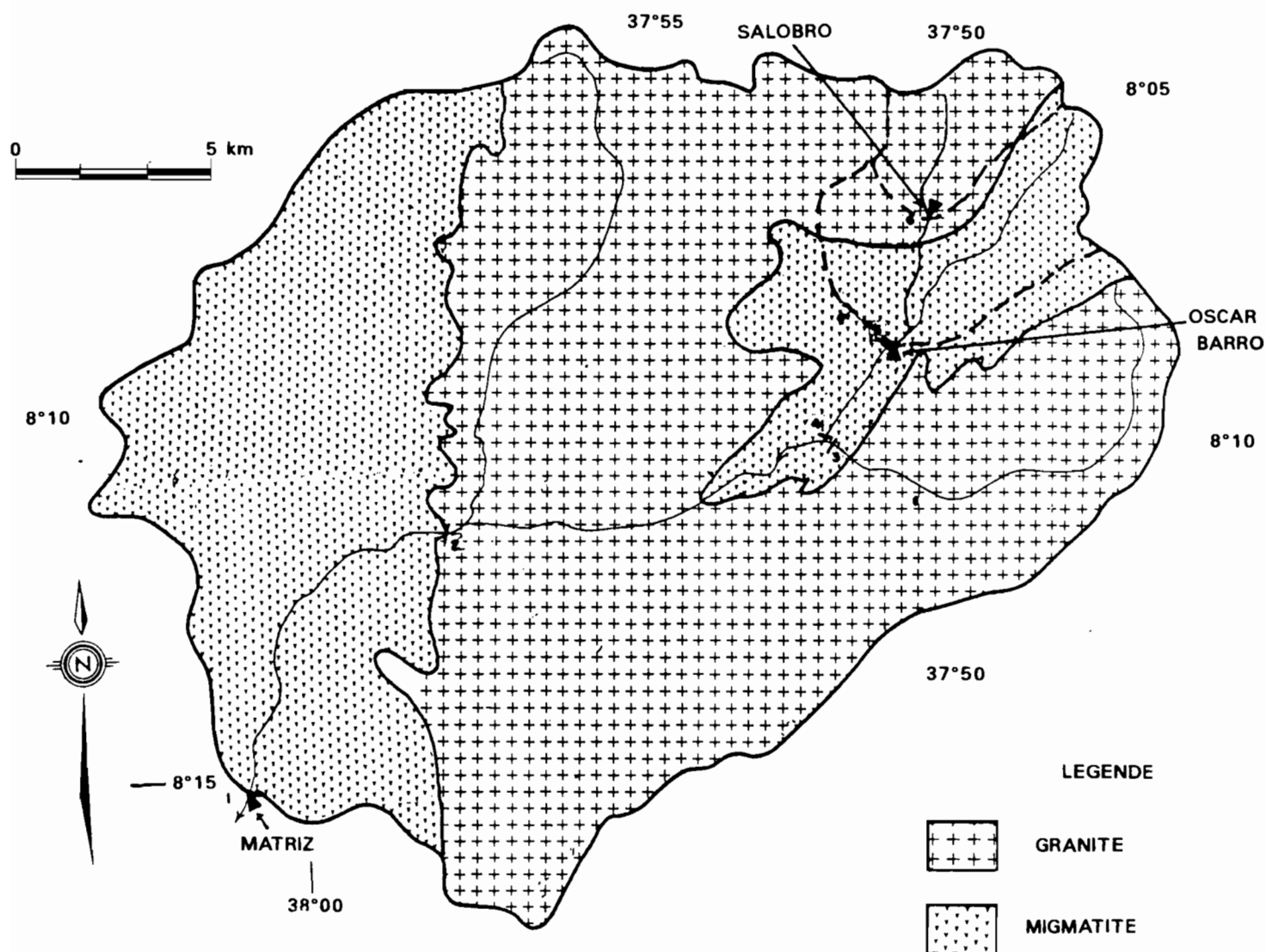
TABLEAU 3.3.2 Principales formations géologiques, types de sol et de végétation. Schéma des liaisons entre sous-sol, sol et végétation du bassin du RIACHO DO NAVIO

FORMATION GÉOLOGIQUE	Diverses	Granite intrusif	Migmatites\Micaschistes ou Paragneiss		
SOL	Affleurement de roche + sols lithosoliques	Lithosolique + brun non calcique	Planosol (forte capacité de rétention)	Régosol épais	Régosol peu épais ou Brun non calcique
Occupation couverture végétale	Peu cultivés Caatinga dense	Peu cultivés Caatinga dense	Peu cultivés grands arbres clairsemés	Généralement cultivés	Peu cultivés Caatinga dense
Perméabilité du sol (mm/h)	0 affleurement 80-120 lithosolique	80-120 lithosolique 20-40 brun n-c	70-100	90-150	25-40
% par sous bassin OSCAR BARROS SALOBRO	38% 55%	17% 0%	0%* 0%	39% 38%	6% 7%

* Les planosols n'existent que sur le bassin de MATRIZ

Ce bassin, faiblement peuplé, est en général peu cultivé sauf dans les zones couvertes de régosols épais et de planosols. Dans le reste du bassin, la caatinga est le plus souvent dense et peu dégradée.

Figure 3.3.1 Esquisse géologique du bassin du RIACHO DO NAVIO



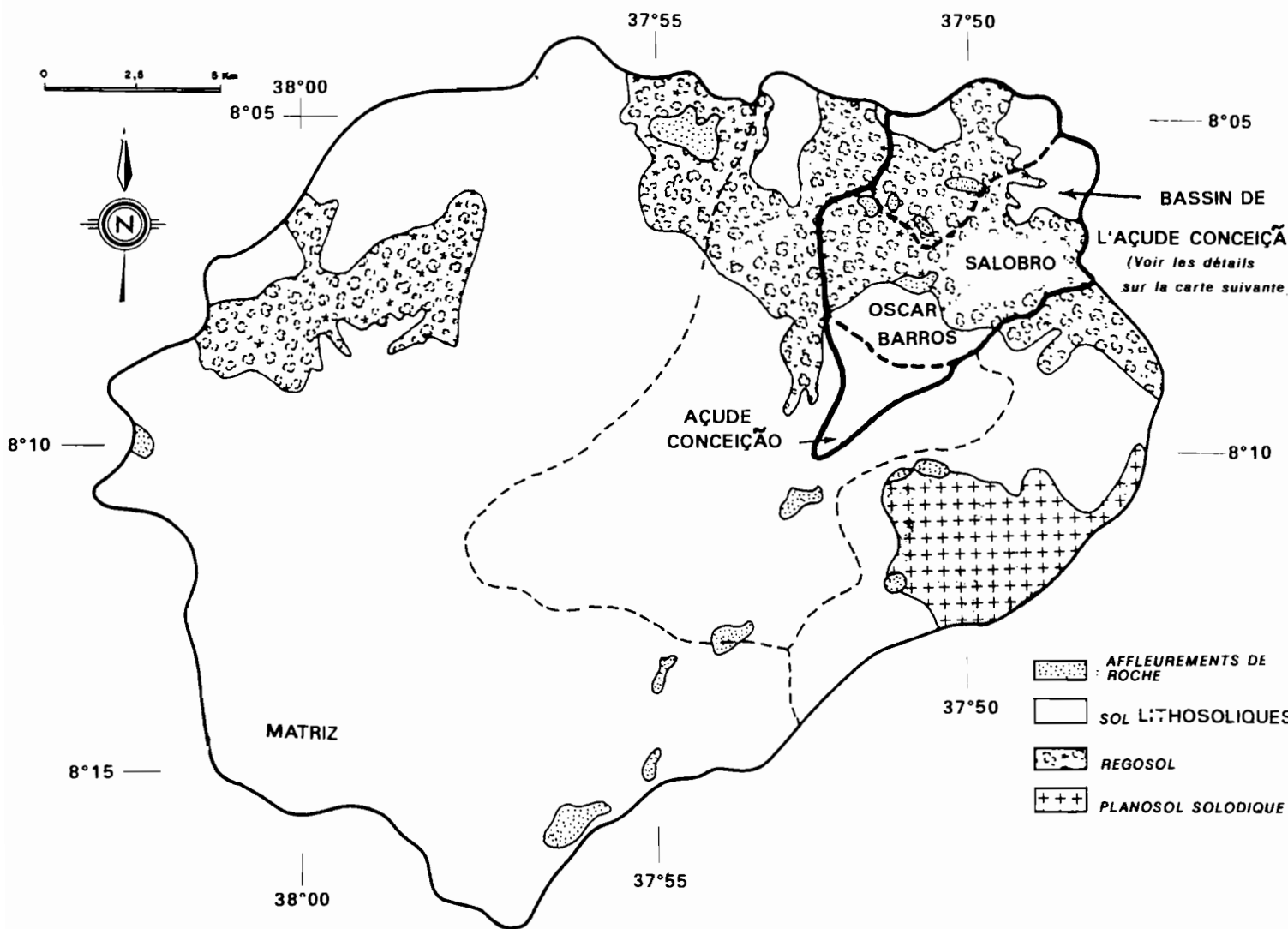


Figure 3.3.2 Esquisse pédologique du bassin du RIACHO DO NAVIO

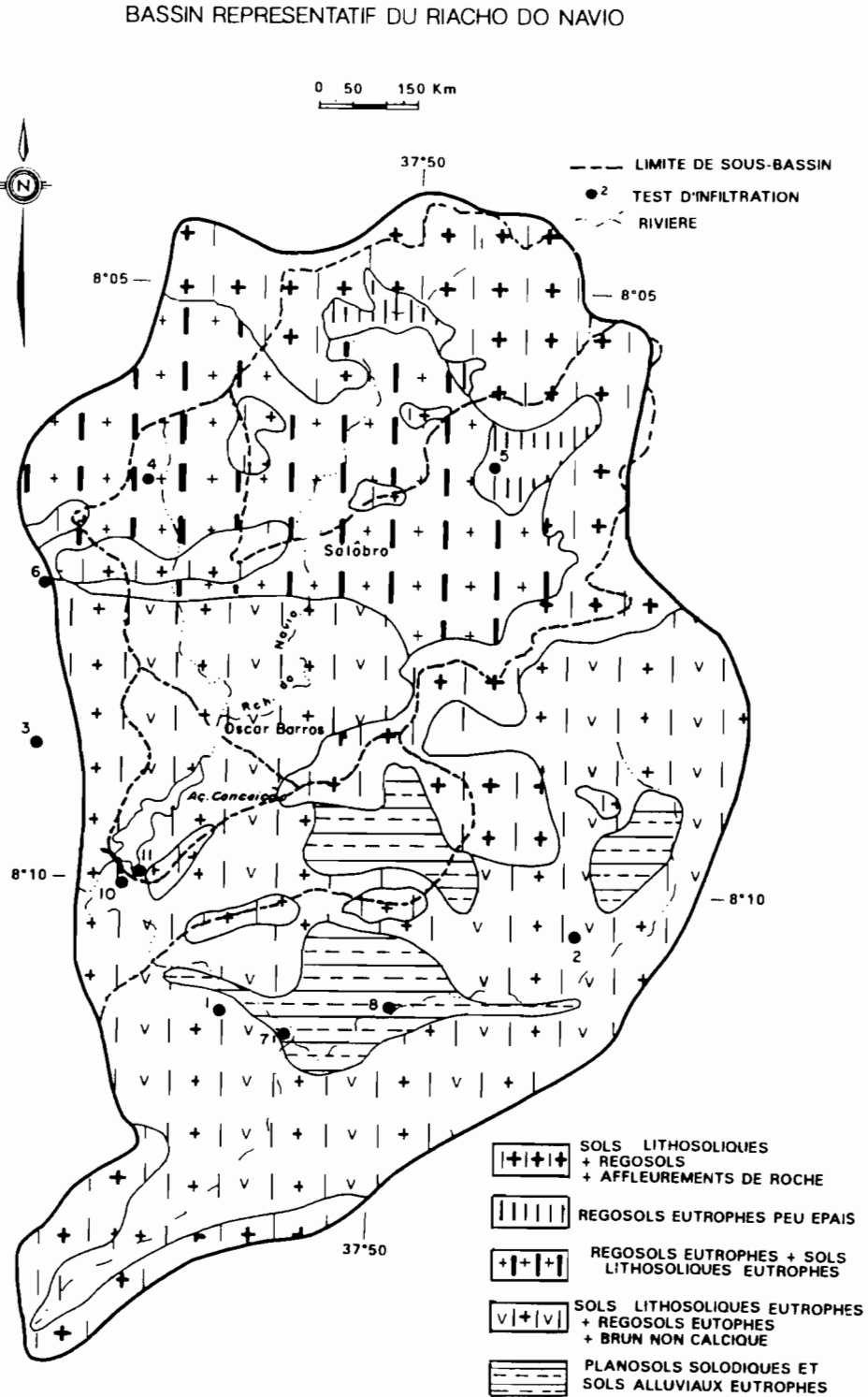


Figure 3.3.3 Carte des sols de la partie orientale du bassin du RIACHO DO NAVIO (selon LEPRUN *et al*)

Morphologie: relief, forme des bassins et réseau de drainage

Le tableau 3.3.3 résume les caractéristiques morphométriques des trois bassins et sous-bassins dont les données hydrométriques sont utilisables.

TABLEAU 3.3.3 Caractères morphométriques du bassin du RIACHO DO NAVIO

CARACTERES MORPHOMETRIQUES	B A S S I N S		
	MATRIZ	SALOBRO	O. BARROS
<u>Taille et forme</u>			
.Surface(km ²)	468	15,6	45,2
.Périmètre (km)	90	18	29,5
.Indice de compacité C	1,2	1,3	1,2
<u>Pente et Relief:</u>			
.Classe de relief	R _{4/5}	R _{4/5}	R _{4/5}
.Altitude moyenne (m)	530	600	580
.Indice global de pente (m/km)	9	7	17
.Dénivelée spécifique (m)	200	110	125
<u>Réseau de drainage:</u>			
.Densité de drainage (km/km ²)	1,4	1,7	1,4
.Rapport de Longueur R _l	2,0	1,2	1,7
.Rapport de confluence R _c	3,9	3,3	3,6

Densité d'açudes

Comme dans les régions voisines, la densité d'açudes sur ce bassin est relativement basse, conséquence probable de sa faible population.

On ne compte aucun açude à l'intérieur des bassins de SALOBRO et d'OSCAR BARROS.

Six açudes ont été recensés à l'intérieur du bassin principal de MATRIZ. Ils contrôlent une surface de 120 km², soit plus de 25% de la surface totale du bassin.

Le bassin d'alimentation de l'açude CONCEIÇÃO (49 km²) est pratiquement complètement contrôlé par la station d'OSCAR BARROS (45,2 km²). Une étude détaillée du comportement de cet açude et de l'évaluation des différents éléments de son bilan hydrologique a permis, par exemple, de préciser l'évaluation des coefficients permettant de calculer son évaporation à partir de mesures sur bac de classe A. Ces données ont été ensuite utilisées par POUYAUD (1985) pour comparer les comportements évaporatoires des lacs des régions semi-arides africaines et brésiliennes.

Comparaison avec les autres bassins étudiés sur socle cristallin

Par rapport aux deux autres grands ensembles de bassins de SUME et de TAUA¹⁷, tous deux situés sur socle cristallin et entre les isohyètes 500 et 600 mm, nous pouvons signaler les différences suivantes:

Les classes de relief et les dénivelées spécifiques du bassin du RIACHO DO NAVIO sont supérieures à celles de SUME et surtout de TAUA. Un examen plus attentif de ce problème, nous montre que les pentes moyennes des sols de ces bassins sont en fait comparables et qu'il faut plutôt rechercher l'explication des différences de ces indices dans des variations de "l'amplitude du relief" que ces indices représentent beaucoup mieux que les pentes des sols.

On rencontre sur le bassin du RIACHO DO NAVIO un type de sol pratiquement absent des bassins de TAUA et SUME: les régosols.

Par contre, on ne rencontre presque pas de sols bruns non calciques sur le RIACHO DO NAVIO, alors que ces sols semblent omniprésents sur les deux autres ensembles.

Il n'a malheureusement pas été possible d'étudier sur le bassin du RIACHO DO NAVIO de tout petits bassins, de parcelles ou de petits açudes, comme cela a été fait à SUME et à TAUA.

En fait, ces mesures sur tout petits bassins, fort instructives et nécessaires pour expliquer les phénomènes, n'ont vraiment démarré qu'au début des années 1980, bien après la fermeture du bassin du RIACHO DO NAVIO.

3.3.2 Dispositif de mesure

La figure 3.3.4 donne une idée du réseau hydropluviométrique qui a fonctionné entre juillet 1970 et septembre 1977 sur ce bassin: 44 pluviomètres, 5 stations limnigraphiques, 4 stations limnimétriques sur retenue et 7 pluviographes.

La surface moyenne contrôlée par ces appareils varie entre 11 km² par pluviomètre et 67 km² par pluviographe pour le plus grand bassin de MATRIZ et 1,3 km² par pluviomètre et 16 km² par pluviographe pour le plus petit de SALOBRO.

Deux stations météorologiques ont été installées, l'une à BETANIA près de l'exutoire du bassin, l'autre près de l'açude CONCEIÇÃO, déjà cité.

La qualité des observations pluviométriques, pluviographiques, limnimétriques et l'étalonnage des stations hydrométriques sont en général bons. Cela est surtout dû aux gros efforts logistiques fournis par la SUDENE qui a maintenu une présence quasi-permanente de techniciens sur le terrain en saison des pluies, pendant les 7 années observées.

17 Nous ne comparerons pas le Bassin du RIACHO DO NAVIO au bassin de JUATAMA qui représente une région cristalline à fort relief et avec de nombreux affleurements, visiblement très différente des trois premiers ensembles.

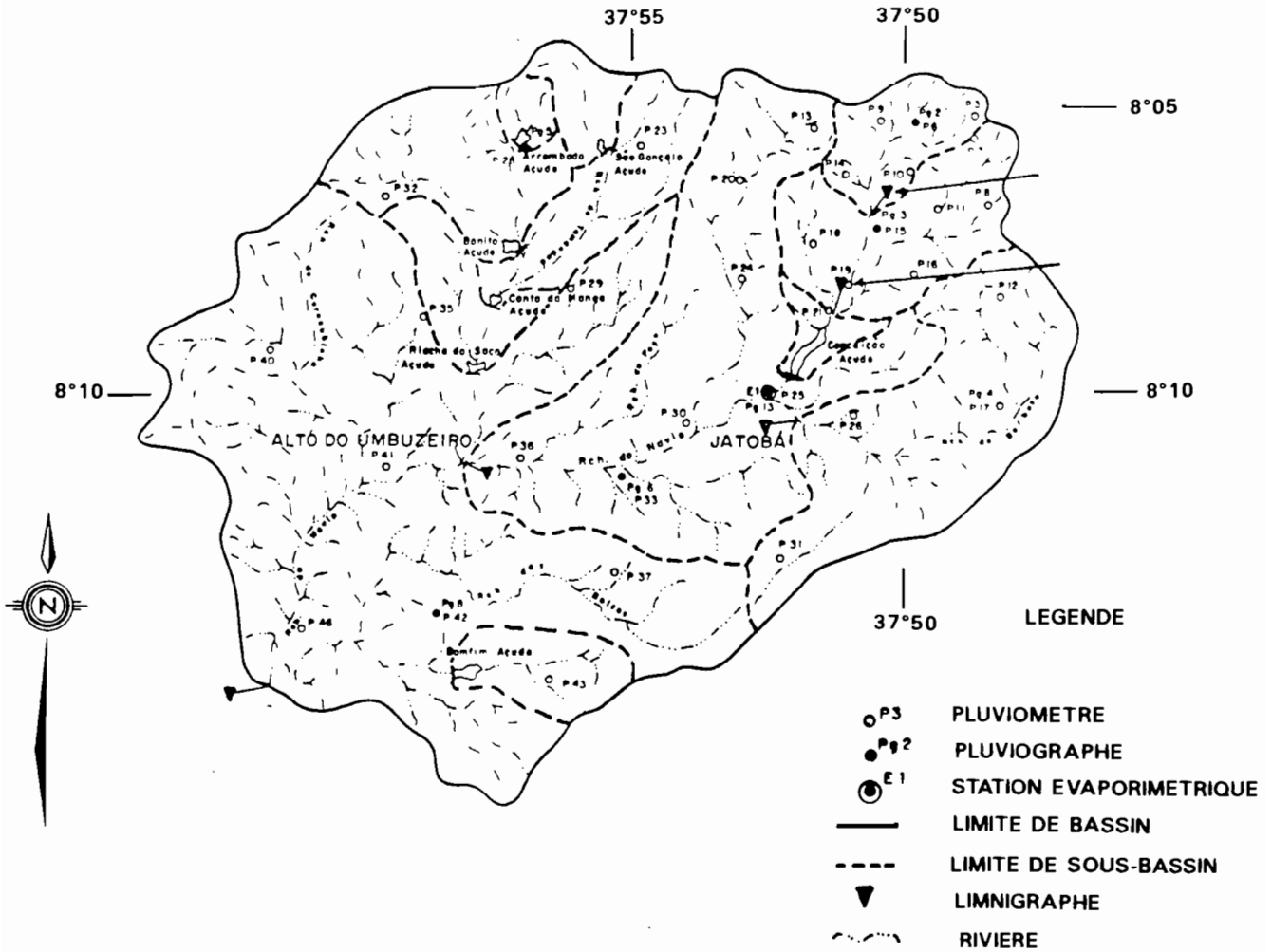


Figure 3.3.4 Réseau hydropluviométrique du bassin du RIACHO DO NAVIO

Il s'est vite avéré que seules les stations hydrométriques pourvues de section de contrôle en béton (SALOBRO, OSCAR BARROS et MATRIZ) ont permis une exploitation continue de leur information grâce à la stabilité de leur tarage.

Le fonctionnement des limnigraphes, installés loin des lits et reliés aux cours d'eau par des tuyaux enterrés, s'est avéré délicat dans ces rivières à fort transport solide. Une partie des enregistrements d'OSCAR BARROS et de SALOBRO est, pour cette raison, malheureusement suspecte et a dû être écartée.

La technique de construction de radiers larges en ciment, surélevés de quelques décimètres par rapport au profil naturel sableux du lit, et avec des limnigraphes en communication directe avec la rivière, a par la suite été utilisée avec succès sur les autres bassins représentatifs du "Nordeste".

3.3.3 Résultats obtenus

Chronique des lames observées

Le tableau 3.3.4 présente les totaux annuels des lames précipitées et écoulées.

TABLEAU 3.3.4 Chronique des lames précipitées et écoulées en mm du bassin du RIACHO DO NAVIO

ANNEE	Fréquence estimée de la pluviométrie	MATRIZ		OSCAR BARROS		SALOBRO	
		Prec.	Ecoul.	Prec.	Ecoul.	Prec.	Ecoul.
1970-71	0,50	585	7,86	515	1,21	507	3,51
1971-72	0,45	562	4,28	598	3,39	624	11,2
1972-73	0,45	571	2,85	579	0,48	609	5,10
1973-74	(0,05)	1042	119,0	1058	104,0	1079	149,0
1974-75	(0,07)	945	15,9	1056	29,2	1086	67,2
1975-76	0,55	502	7,22	491	6,4	519	16,6
1976-77	0,20	819	13,0	767	3,33	840	24,8
Moyenne	-	718	24,3	732	21,1	752	39,6
L ₆₀₀			35		31		47

■ Chronique des précipitations

On constate qu'aucun des sept totaux annuels pluviométriques n'est nettement déficitaire.

Les années 1971,1972,1973 et 1976 sont proches de la médiane. L'année 1977 a une période de retour quinquennale humide et les années 1974 et 1975 sont exceptionnellement abondantes,avec une période de retour de l'ordre de 20 ans.

La moyenne des précipitations sur la période 1971 à 1977 est de 720 mm. Elle est supérieure de 31% à la moyenne interannuelle de 550 mm estimée sur ce bassin.

■ Chronique des lames écoulées

La chronique des lames écoulées est évidemment beaucoup plus irrégulière. On constate ainsi que 60 à 70 % du volume total écoulé au cours des sept ans, survient au cours de la seule année 1974. 80 à 85 % de ce volume survient au cours des deux années 1974 et 1975. En faisant abstraction de l'année 1974, les moyennes des lames écoulées observées seraient diminuées de 60 %.

Si l'on compare les deux années 1974 et 1975, dont les totaux annuels sont très proches, on constate que les écoulements de 1975 sont de l'ordre du tiers de ceux de 1974. Ceci est dû à un étalement plus important des précipitations en 1975.

■ Irrégularité des écoulements. Nécessité de techniques de modélisation

On constate qu'en moyenne, 50 % du volume annuel s'écoule en moins de quinze jours consécutifs et que les rivières sont complètement à sec pendant plus de la moitié de l'année.

Tout ceci montre qu'il est illusoire de vouloir estimer directement les distributions des importants écoulements sans recourir à des techniques de correction et d'homogénéisation de données comme celle de la modélisation.

Si l'on emploie des modèles, ils doivent fonctionner à faible pas de temps, puisque les pas annuels et mensuels ne suffisent pas, comme l'illustre la comparaison des années 1974 et 1975.

Ainsi, bien que la pluviométrie de la période 1971-77 soit **supérieure d'environ 30 %** à l'estimation de la moyenne longue durée, les écoulements observés sont, eux, **inférieurs de plus de 30 %** à l'estimation de longue durée présentée au paragraphe suivant. La figure 3.3.5 illustre bien cette dispersion. Nous avons calculé que si l'on supprimait, par exemple, l'année 1974, la pluviométrie serait encore supérieure de 25 % à la moyenne longue durée alors que les écoulements seraient, eux, **inférieurs de 70 %** à la moyenne!

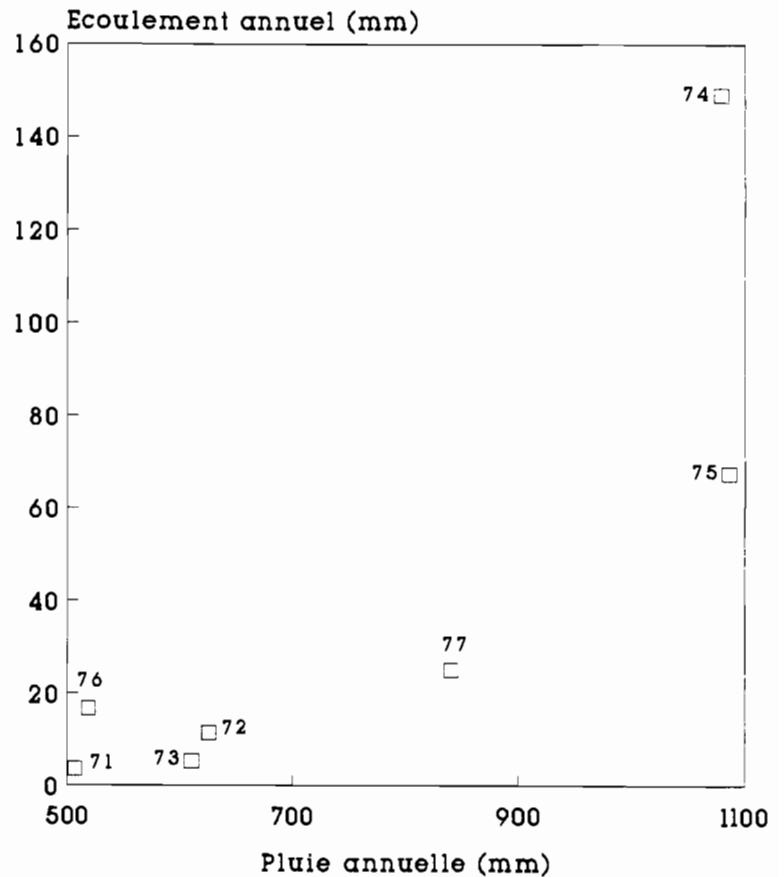


Figure 3.3.5 Dispersion de la relation entre les pluies et les écoulements annuels.

Caractéristiques des crues.

Le tableau 3.3.5 résume les caractéristiques des crues unitaires des trois bassins étudiés, selon les conventions exposées pour le bassin de TAUA.

TABLEAU 3.3.5 Caractéristiques des crues du bassin du RIACHO DO NAVIO

HYDROGRAMME UNITAIRE								
BASSIN	SURFACE	TEMPS DE MONTEE	TEMPS DE BASE	DEBIT MAXI POUR $L_s=1$ mm	$\frac{Q_{max}}{Q_{moy.}}$	X_{10} mm	K_x moy	Q_{10} m ³ /s
Matriz	468 km ²	4 h	13 h	26,7m ³ /s	2,65	12,0	19,7	236,0
O.Barros	45,2 km ²	1 h	9 h	5,5m ³ /s	3,9	25,0	3,55	89,0
Salobro	15,6 km ²	0h 45'	6h 15'	2,55m ³ /s	3,6	27,0	1,47	40,0

La figure 3.3.6 montre la relation entre les pluies, les crues et l'indice de saturation préalable IK. Ce type de graphique a été utilisé comme calage initial du modèle SUDENE/ORSTOM.

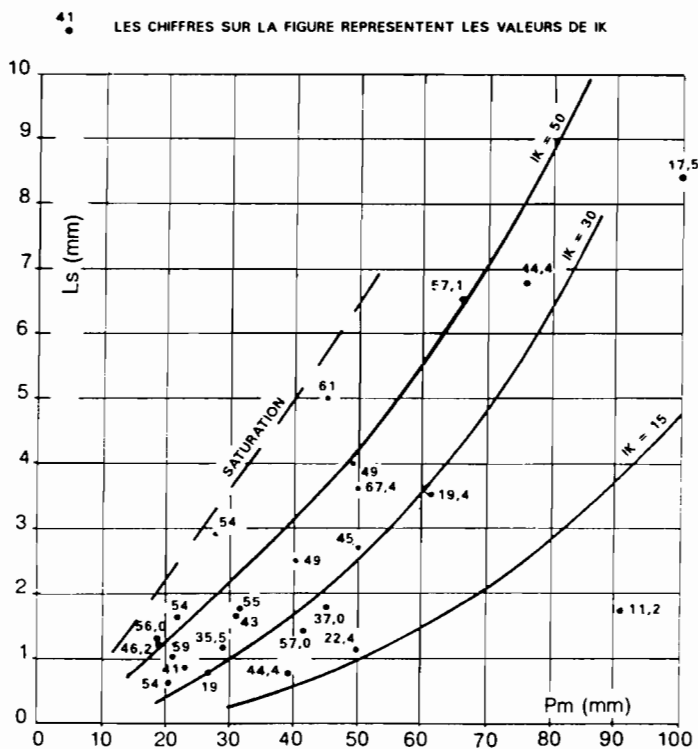


Figure 3.3.6 Liaison entre la pluie (Pm), l'écoulement des crues (Ls) et l'indice de saturation hydrique préalable du bassin (IK).

Lames écoulées caractéristiques

Le tableau 3.3.6 présente les lames écoulées caractéristiques déjà analogues à celles présentées pour les autres bassins (se reporter au bassin de TAUA pour les définitions).

TABLEAU 3.3.6 Lames écoulées caractéristiques du bassin du RIACHO DO NAVIO (mm)

E C O U L E M E N T S									
BASSIN	L600	DECEN.	TRIEN.	MEDIAN	TRIEN.	DECEN.	L(3AC)	CRUE	COEF.
	1	HUM.	HUM.	LA05	SEC	SEC		DECEN.	ECOUL.
			LA033		LA067	LA09		X10	MOYEN %
MATRIZ	35	108	43	24	9	3	23	12	5.8
OSCAR BARROS	31	110	30	14	4	1	12	25	5.2
SALOBRO	47	122	56	31	11	2	31	27	8.2
ILHA GRANDE*	20 à 25								4.2

* La station du réseau général de ILHA GRANDE contrôle un bassin de 2372 km² qui englobe celui du RIACHO DO NAVIO. Sa lame moyenne annuelle est estimée à 17,8 mm. La valeur de L600 de 20 à 25 mm est obtenue après correction par la pluviométrie. Elle est faible par rapport aux autres bassins du cristallin et confirme les lames des trois autres bassins du RIACHO DO NAVIO.

3.3.4 Interprétation : les acquis du bassin du RIACHO DO NAVIO

Le petit nombre et la relative complexité (due à leur taille plutôt élevée) de ces bassins empêchent de proposer, comme pour TAUA, une classification ou typologie des bassins de la région du RIACHO DO NAVIO en fonction de leurs caractéristiques physiographiques et hydrologiques.

Nous présentons également ici les résultats de deux études, qui n'ont pas été répétées sur les autres bassins. Il s'agit d'une tentative de calage d'un modèle de simulation mensuel et de l'étude des termes du bilan de l'açude CONCEIÇÃO pendant sept ans, qui a permis de proposer une formule de passage de l'évaporation "bac" à l'évaporation "açude".

3.3.4.1 Les régimes hydrologiques

■ Ecoulements annuels :

Ils sont relativement faibles pour un bassin situé sur une zone cristalline, mais comparables à ceux de SUME, distant de 100 km à vol d'oiseau et dont la pluviométrie est voisine.

Les coefficients d'écoulement annuel moyens varient entre 5 et 8 %, les coefficients médians n'étant que de 2 à 5% du total précipité.

Malgré la faible densité d'açudes sur ces bassins, plusieurs facteurs peuvent expliquer ces faibles écoulements :

- La bonne conservation de la couverture végétale.
- Le pourcentage relativement élevé de sols épais et relativement perméables tels que les régosols épais ou les lithosoliques épais qui bordent souvent les affleurements rocheux.

Une confrontation des lames et des volumes écoulés sur les deux bassins emboîtés de SALOBRO ($L_{600} = 47 \text{ mm}$; $S = 15,6 \text{ km}^2$) et OSCAR BARROS ($L_{600} = 31 \text{ mm}$; $S = 45,2 \text{ km}^2$) suggère que la plus grande part des écoulements de ces bassins provient des zones d'affleurements rocheux sur fort relief associées à des sols lithosoliques épais.

En effet on calcule par différence que la lame L_{600} du bassin intermédiaire entre SALOBRO et OSCAR BARROS, de surface $S = 45,2 - 15,6 = 29,6 \text{ km}^2$, doit être seulement de 23 mm. Or ce bassin intermédiaire est pratiquement dépourvu d'affleurements rocheux.

Il aurait été sûrement très instructif d'étudier, avec de plus petits bassins stratégiquement situés, les mécanismes régissant les écoulements de ces différentes zones.

■ Années sèches consécutives

La figure 3.3.7 représente la simple accumulation des lames écoulées à la station de SALOBRO. Ce graphique montre bien l'apport exceptionnel de quelques rares années et l'existence de groupes ou de "paquets" d'années consécutives déficitaires. La régularisation des ressources en eau au cours de ces périodes déficitaires constitue le principal problème à résoudre pour garantir la survie des populations dans cette région.

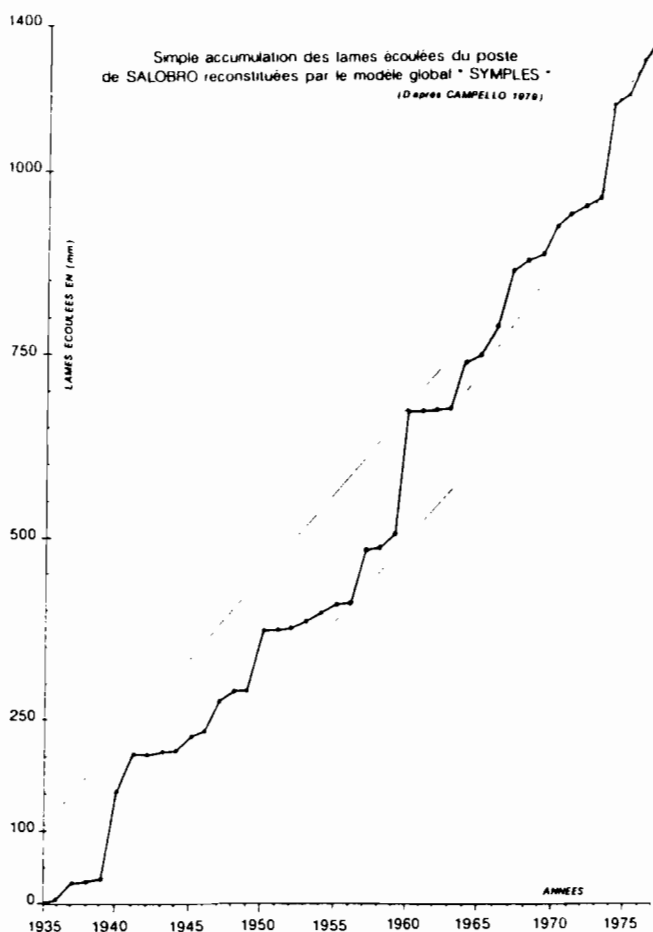


Figure 3.3.7 Simple accumulation des lames écoulées à la station de SALOBRO

■ Régularité relative des régimes :

Les lames des crues décennales sur ces bassins sont globalement les plus faibles de tous les bassins étudiés sur zone cristalline. Elles varient entre 10 et 30 mm. Ceci est encore un indice du non-ruissellement de certaines parties du bassin, expliquant à la fois les écoulements annuels peu élevés et la faiblesse des fortes crues.

3.3.4.2 Tentative d'ajustement d'un modèle simplifié utilisant un indice pluviométrique :

Une tentative a été effectuée par NOUVELOT *et al* (1979) pour ajuster un modèle mensuel permettant le calcul direct des lames écoulées annuelles à partir d'un indice pluviométrique de la forme

$$I_p = \sum_{\text{mois}=1}^{12} (P_{\text{mensuel}} - 65)$$

Cet indice est calculé pour chaque année à partir des totaux pluviométriques mensuels et permet le calcul direct des lames écoulées annuelles Le à l'aide des formules suivantes:

Pour MATRIZ $I_p < 184 \text{ mm}$: $\text{Log}_{10}(Le) = 0,01204 I_p - 1,322$
 $I_p > 184 \text{ mm}$: $\text{Log}_{10}(Le) = 0,00277 I_p + 0,377$

Pour O.BARROS $I_p < 192 \text{ mm}$: $\text{Log}_{10}(Le) = 0,01655 I_p - 2,415$
 $I_p > 192 \text{ mm}$: $\text{Log}_{10}(Le) = 0,00305 I_p + 0,185$

Pour SALOBRO $I_p < 213 \text{ mm}$: $\text{Log}_{10}(Le) = 0,00701 I_p - 0,358$
 $I_p > 213 \text{ mm}$: $\text{Log}_{10}(Le) = 0,00274 I_p + 0,457$

Quand on compare, sur le tableau TT 3.3.7, les écoulements calculés à l'aide du modèle mensuel aux résultats obtenus avec des modèles à pas de temps journalier, qui sont maintenant utilisés systématiquement sur tous les bassins, on constate que, dans le cas du RIACHO DO NAVIO, les lames écoulées sont sous estimées par ce modèle mensuel. Nous avons comparé également l'ajustement effectué par CAMPELLO (1979) avec le modèle de simulation SYMPLES qui fonctionne au pas de temps journalier.

TABLEAU 3.3.7 Comparaison des lames calculées par le modèle simplifié mensuel et le modèle journalier du bassin du RIACHO DO NAVIO.

Fréquence AU DEPAS- SEMENT	Modèle SUDENE/ORSTOM			Modèle SIMPLES		Modèle MENSUEL	
	MATRIZ	SALOBRO	O.BARROS	SALOBRO	O.BARROS	SALOBRO	O.BARROS
0,1	108	122	110	75	54	59	29
0,5	24	31	14	11	5	4,9	1,4
0,9	3	2	1	0,8	0,2	0	0

La comparaison des résultats des trois types de modèles semble plutôt décevante. Cependant, la simplicité du modèle mensuel est très séduisante.

De nouvelles formes de modèles pourraient être testées pour tenter de représenter simplement les divers régimes hydrologiques identifiés. La mise au point de modèles simplifiés correctement ajustés et validés à l'aide de modèles plus sophistiqués, devrait être l'un des aboutissements logiques de ce programme d'étude de petits bassins versants représentatifs.

3.3.4.3 Fonctionnement de l'açude CONCEIÇÃO. Une étude de cas.

■ Surdimensionnement de l'açude Conceição :

Cet açude, quand il est plein, a une profondeur de 10 m, un volume de 1.400.000 m³ (soit 0,9 fois le volume moyen écoulé) et une surface maximale de 385.000 m².

Son volume est proche du double du volume recommandé par CADIER *et al* (1990) ou MOLLE (1991c) pour un petit açude ne devant pas assurer une régularisation interannuelle.

On peut penser que sa profondeur, relativement importante pour un açude situé sur un petit cours d'eau, pourrait lui permettre de jouer partiellement ce rôle de régularisation pluriannuelle dans le cas de certaines sécheresses prolongées, et pourrait justifier son surdimensionnement.

Nous allons donc tenter d'analyser, dans cette optique, les variations de son niveau qui ont été suivies pendant 18 ans entre 1970 et 1990, bien après l'arrêt des études sur ce bassin. (Voir figure FF 3.3.5).

■ Pertes par évaporation :

Donnons tout d'abord quelques ordres de grandeurs relatifs aux volumes évaporés pour divers taux de remplissage de cet açude :

- Cet açude est peu utilisé pour l'irrigation. Le coefficient de passage K_a de l'évaporation sur bac de classe A à l'évaporation de cet açude est en moyenne de 0,83¹⁸ (voir figure 3.3.8). Ceci montre que les pertes par infiltration et les prélèvements sont faibles et probablement négligeables devant les volumes évaporés. Rappelons que la lame annuelle évaporée, mesurée sur bac de classe A, varie entre 2500 et 3000mm.
- On constate que compte tenu des précipitations directes sur la retenue qui sont en général supérieures à 300 mm par an, le rabaissement effectif moyen d'un açude présentant des pertes négligeables et qui est peu utilisé ne dépasse que rarement 2 mètres par an.
- Quand l'açude CONCEIÇÃO est plein, une lame d'eau de 2 mètres correspond approximativement à 600.000 m³, c'est à dire à un volume légèrement inférieur au volume annuel écoulé médian (calcul fait pour une profondeur de 9 m).
- Quand l'açude est presque vide une lame d'eau de 2 mètres correspond approximativement à 100.000 m³, c'est à dire à peu près au volume écoulé quinquennal sec (calcul effectué pour une profondeur de 3 m)

18 Cette valeur de $K_a = 0,83$ confirme les coefficients proposés par GIRARD (1966) et a été précisée et justifiée ultérieurement par MOLLE (1989).

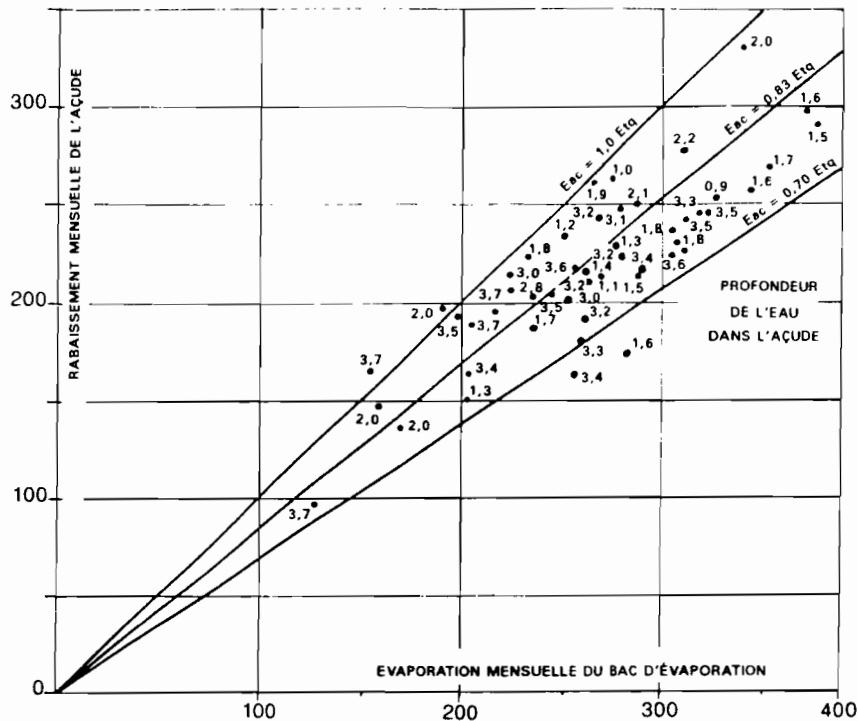


Figure 3.3.8 Rabaissement de l'açude CONCEIÇÃO en fonction de l'évaporation bac et de la profondeur de l'açude

■ Fonctionnement de l'açude :

Nous constatons, sur la figure 3.3.9, que cet açude ne s'est jamais asséché au cours des années observées. Cela a pourtant bien failli arriver à la fin de l'année 1973. Et il est probable qu'il se serait asséché en 1971, 72 et 73, s'il avait été utilisé pour l'irrigation.

Constatons également, qu'au cours de la période de 1970-90, on n'observe aucune période de plus de trois ans consécutifs franchement déficitaires.

Une analyse des chroniques des écoulements reconstitués par simulation avec le pluviomètre de BETANIA, situé à 25 km de l'açude CONCEIÇÃO (voir figure 3.3.7) nous montre que cet açude se serait probablement asséché au cours des deux périodes critiques de 1950-1956 et 1941-1946, qui sont des périodes de 5 ans déficitaires consécutifs avec une lame écoulée moyenne de 3 mm.

En guise de conclusion, on peut estimer que cet açude de 10,5 m de profondeur peut fournir des volumes d'eau importants, suffisants pour irriguer un périmètre de moins de 5 ha, par exemple, durant des périodes déficitaires d'une ou deux années sèches consécutives. Ce type d'açude peut rester en eau et subvenir à des besoins moins importants comme l'alimentation humaine et celle du bétail, pendant trois ans, mais s'asséchera presque certainement si une sécheresse de durée plus grande survient, comme cela est déjà arrivé dans le passé.

Enfin, notons qu'un açude "surdimensionné", comme l'açude CONCEIÇÃO, ne déverse que tous les trois ou quatre ans ce qui est, évidemment, très pénalisant pour les riverains situés en aval.

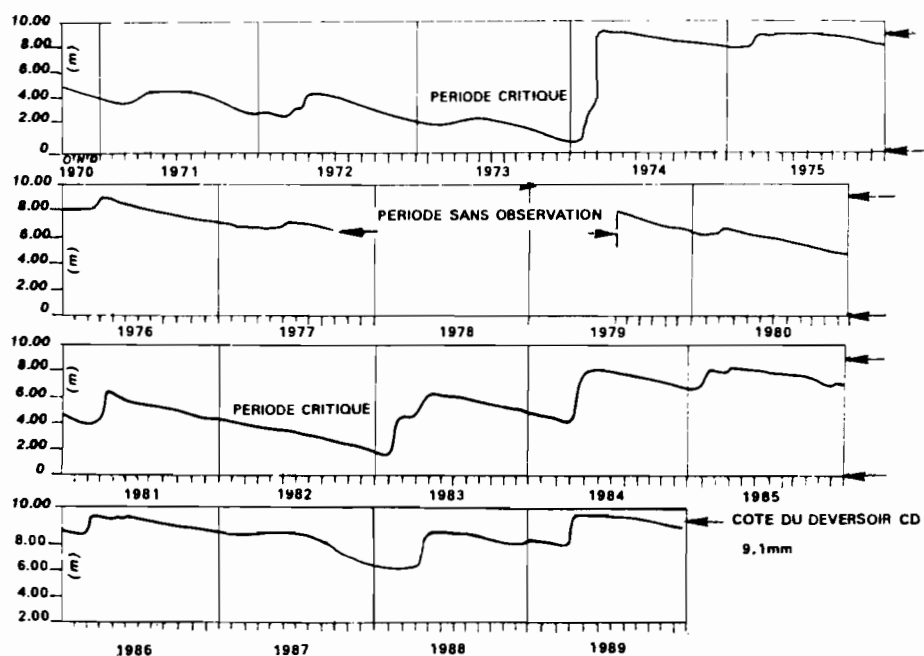


Figure 3.3.9 Variations du niveau de l'açude CONCEIÇÃO

3.3.5 Conclusions du bassin de RIACHO DO NAVIO

Les écoulements et les crues des trois bassins qui composent le RIACHO DO NAVIO sont faibles pour les bassins situés sur socle cristallin. Cette faiblesse peut sans doute être attribuée à la proportion importante de ces bassins couverts de régosols et à la bonne conservation de sa couverture végétale. La diminution des lames écoulées entre les bassins de SALOBRO et d'OSCAR BARROS nous suggère que les affleurements rocheux produisent la plus grande partie des écoulements dans ces deux bassins.

La complexité de ces mécanismes et le petit nombre de ces bassins étudiés nous interdisent d'aller plus loin dans l'échafaudage de ce type de conclusion.

L'analyse du bilan de l'açude CONCEIÇÃO a permis, en son temps, de proposer un coefficient de passage entre les évaporations du bac et de l'açude, coefficient confirmé et précisé ultérieurement par MOLLE (1991). Vingt années d'observations limnimétriques montrent que cet açude, de dix mètres de profondeur, a failli s'assécher deux fois: en 1973 et en 1983. Le bassin de cet açude n'a donc pas une taille suffisante pour garantir l'alimentation d'un périmètre d'irrigation avec un risque de défaillance suffisamment faible pour permettre des cultures pérennes.

3.4 LE BASSIN REPRESENTATIF DE JUATAMA

Le bassin de JUATAMA est le seul bassin représentatif qui ait déjà été étudié par le programme du GVJ. Il montre que les mécanismes hydrologiques de ces régions accidentées et rocheuses sont complexes. Les antagonismes entre les zones imperméables et les zones qui retiennent les écoulements y sont très forts. Les écoulements sont finalement plus faibles que ce que les nombreux inselbergs et affleurements de cette région pourraient laisser prévoir.

3.4.1 Historique

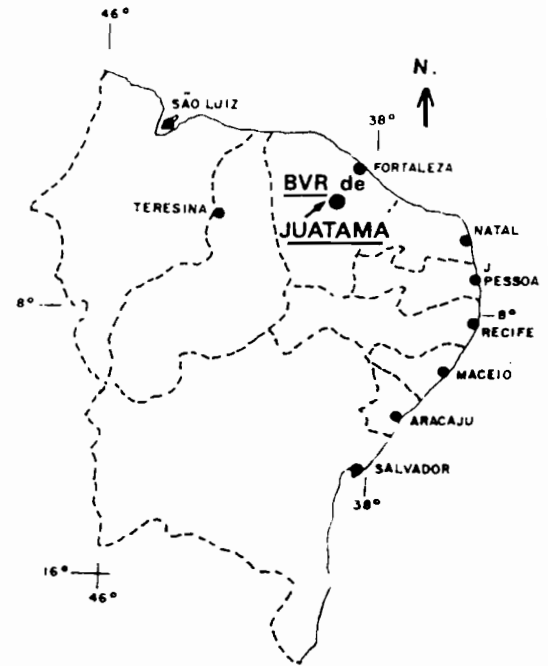
Situé au centre de l'Etat du Ceará, près de la ville de Quixadá, à 200 km de Fortaleza et à 600 km de Recife, le bassin représentatif de Juatama contrôle une surface de 19,2 km². Il a été installé en 1963 dans le cadre des Etudes de mise en valeur de la Vallée du Jaguaribe (GVJ). Son objectif principal était de compléter rapidement l'information disponible fournie par le réseau général, sur le comportement hydrologique de la partie cristalline de cette grande vallée.

L'étude du fonctionnement de petits bassins dans cette région, où les petits açudes sont nombreux, avait été entreprise simultanément avec des études similaires dans la région voisine du CARIRI, pratiquement démunie d'açudes afin de mieux cerner l'influence de ces retenues sur les régimes hydrologiques de cette région.

Deux campagnes ont été réalisées à cette époque: 1963-64 et 1964-65.

Neuf ans plus tard, dans le cadre des études hydrologiques planifiées de petits bassins entreprises par la SUDENE, les observations hydrologiques sur ce bassin étaient reprises avec un dispositif de mesure sur le terrain, pratiquement identique à celui de la première période. Elles ont fait l'objet de trois nouvelles campagnes de mesure : 1974-75, 1975-76 et 1976-77.

Les résultats obtenus dès les premières campagnes ont été résumés dans la monographie hydrologique du Val du Jaguaribe (DUBREUIL *et al*, 1968) et dans des rapports plus détaillés (GVJ, 1965). Ceux de la deuxième période sont consignés dans un rapport de campagne (VIANA, 1977) et dans un rapport de synthèse final (HERBAUD *et al*, 1989b). Une première synthèse et modélisation des données de ce bassin avaient déjà été effectuées par CAMPELLO (1979).



BASSIN DE JUATAMA



Paysages caractéristiques



Affleurements rocheux et sols litosoliques

sols podzoliques, puits, grands arbres, rétention d'eau

solonetz

plansols, rétention d'eau

3.4.2 Description du bassin

Installé avant la planification réalisée par NOUVELOT (1974), le BVR de JUATAMA se trouve dans la zone homogène H₃, P₁, R₅, A₁ dont nous rappelons les caractéristiques :

H₃: Précipitation annuelle entre 600 et 800mm.

P₁: Sous sol imperméable.

R₅: Relief assez fort.

A₁: Altitude inférieure à 500m.

Climat et pluviométrie

La pluviométrie moyenne du bassin de JUATAMA est plus élevée que celle des bassins précédents. Etant estimée à 820 mm, elle dépasse légèrement la limite supérieure de la zone hydrologique homogène qui l'englobe. Sa variabilité est forte, son coefficient de variation est évalué à 0,42, le total décennal humide à 1270 mm, le décennal sec à 430 mm et le centennal sec à 263 mm.

Les autres caractéristiques pluviométriques et météorologiques de ce bassin sont normales pour le Sertao nord : saison des pluies entre janvier et mai centrée sur mars ; précipitation en 24 h de période de retour annuelle : 62 mm ; décennale : 103 mm; température moyenne annuelle proche de 27°C avec maximum en octobre et minimum en juillet ; vents dominants d'est généralement faibles (vitesse moyenne annuelle de 1,50 m/s); totaux annuels d'évaporation sur bac de classe A variant entre 2.500 et 3.000 mm, etc.

Géologie, sol et végétation

Le bassin de JUATAMA est situé entièrement sur le socle précambrien composé de granite et de diorites granitiques, qui peuvent affleurer en inselbergs sur près de 25 % de la surface du bassin.

Les affleurements rocheux associés à un fort relief, constituent la caractéristique la plus visible de ce bassin et contribuent à la beauté de son paysage.

La carte 3.4.1 montre la répartition des principaux types de sols sur ce bassin, et la figure 3.4.2 indique le schéma de la succession de sols le long d'un versant ou toposéquence. Immédiatement en dessous des affleurements, qui constituent des impluviums importants, se trouvent souvent des sols lithosoliques assez perméables et des sols podzoliques eutrophes, profonds, à forte capacité de rétention. Ces sols sont probablement capables de retenir ou de retarder une bonne partie des écoulements en provenance de ces affleurements, le stockage étant mis à profit par la population, qui y a creusé de nombreux puits.

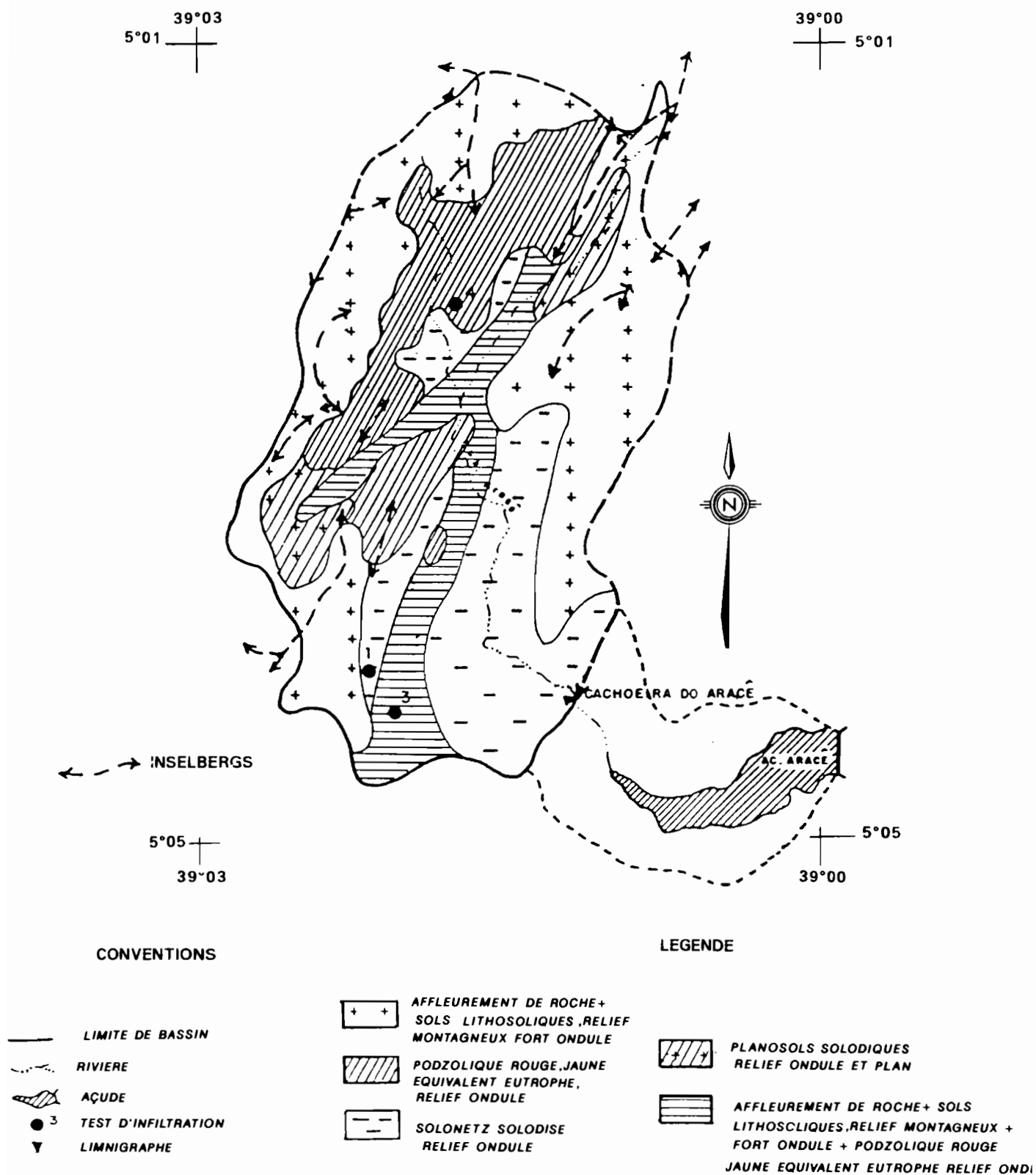


Figure 3.4.1. Cartes des sols du bassin de JUATAMA (adapté de LEPRUN *et al.* 1983)

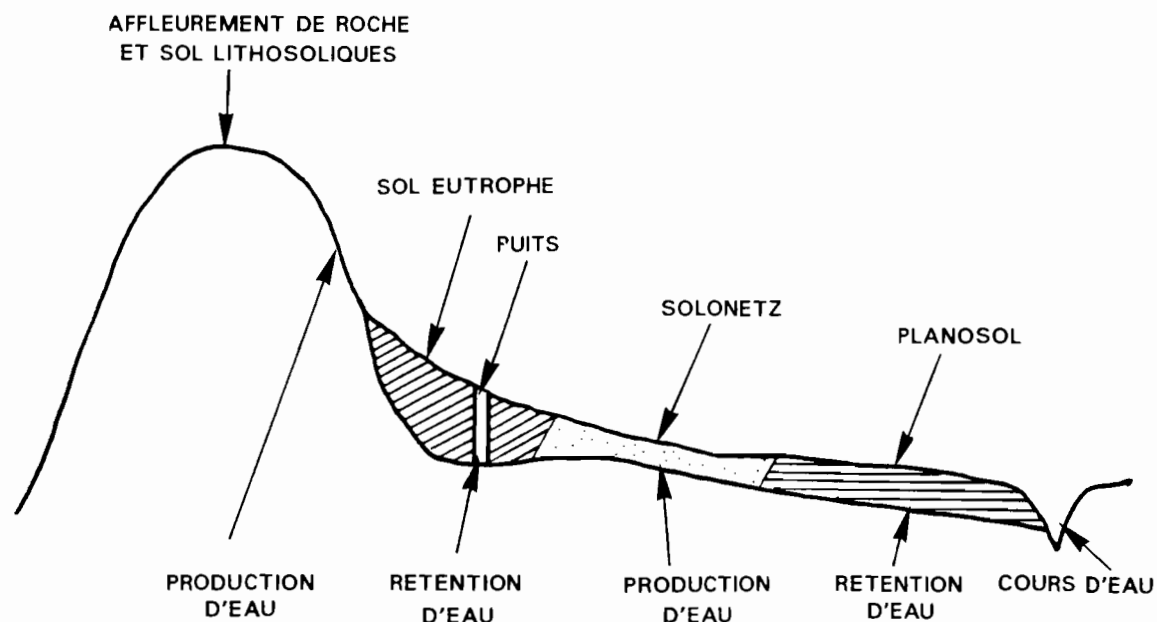


Figure 3.4.2 Toposéquence typique de la région de JUATAMA

Plus bas, dans la toposéquence, on trouve des solonetz imperméables et à faible capacité de rétention qui "débouchent" sur des planosols sableux, plus épais, mais qui deviennent imperméables quand ils sont saturés.

Nous constaterons plus loin que ce bassin est caractérisé par des temps de base plus élevés et des coefficients d'écoulement plus faibles que ne le laisseraient prévoir son fort relief et l'importance de ses affleurements. Ces anomalies trouvent probablement leur explication dans l'une ou l'autre ou les deux zones de rétention de la toposéquence signalées ci-dessus.

Le tableau suivant indique les vitesses d'infiltration au bout de six heures, mesurée par la méthode de Muntz. Chaque valeur correspond à la moyenne de trois essais réalisés sur les sites reportés sur la figure 3.4.1 (source : Leprun *et al* 1983).

TABLEAU 3.4.1 Résultats des tests d'infiltration du Bassin de JUATAMA. Méthode de Muntz.

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES (mm/h)
JU 01	Solonetz	8,3
JU 03	Planosol	205
JU 04	Podzolique rouge jaune équivalent eutrophe	57

Le tableau 3.4.2 montre les liens existants entre certaines caractéristiques physiographiques des différents bassins étudiés :

TABLEAU 3.4.2 Principales formations géologiques, types de sol et végétation du bassin de JUATAMA

Toposéquence ou Sens de l'écoulement et selon la pente				
Type de sol	Affleurement associé avec lithosolique	Podzolique* eutrophe	Solonetz	Planosol*
Relief	Très fort	Fort	Moyen	Faible
Occupation du sol	Végétation naturelle (caatinga)	Très cultivé	Cultivé	Très cultivé
Perméabilité	Nulle pour la roche Élevée pour le lithosolique** (84mm/h)	Moyenne 57mm/h	Très faible 8mm/h	Forte 200mm/h
Pourcentage dans le bassin	45%	22%	21%	12%

* Ces sols, caractérisés par une forte capacité de rétention, doivent intercepter une bonne part des écoulements provenant de l'amont.

** Mesurée sur d'autres bassins.

Couverture végétale

Ce bassin est relativement peuplé ; l'habitat y est rural et dispersé.

Les zones les plus favorables ont été mises en culture : ce sont surtout les sols podzoliques plus riches et à forte capacité de rétention et les planosols, sur faible relief et à très forte capacité de rétention. Près de 30 % des sols du bassin sont ainsi cultivés, principalement en coton, maïs et haricot.

Les zones de solonetz ont une végétation très clairsemée à cause de la faible épaisseur et fertilité de leur horizon A sableux ainsi que de l'imperméabilité et de la compacité de leur horizon B argileux.

Sur les autres zones du bassin non cultivées (podzoliques et lithosoliques), on rencontre une caatinga relativement dense.

Relief et morphologie

Le fort relief et l'importance des affleurements rocheux sont les aspects les plus frappants de ce bassin. Les parois lisses et abruptes des inselbergs aux formes souvent arrondies en pain de sucre, dominant des glacis raides puis le reste du paysage de plusieurs centaines de mètres.

Le tableau 3.4.3 résume les principales caractéristiques morphométriques du bassin de JUATAMA:

TABLEAU 3.4.3 Caractères morphométriques du bassin de JUATAMA

Caractères Morphométriques	
Taille et forme :	
.Surface(km ²)	19,2
.Périmètre (km)	18,6
.Rectangle équivalent:	
.Longueur (km)	6,2
.Largeur (km)	3,1
.Indice de compacité C	1,19
Pente et Relief :	
.Classe de relief	R5
.Altitude moyenne (m)	660
.Différence des cotes corresp. à 5% et 95% de la surface (m)	200
.Indice global de pente (m/km)	32
.Dénivelée spécifique (m)	142
Réseau de drainage :	
.Densité de drainage (km/km ²)	5,42

Açudes

■ Les petits açudes :

TABLEAU 3.4.4 Petits açudes recensés à l'intérieur du bassin de JUATAMA

Période	Nombre d'açudes	Superficie totale contrôlée km ²	% du bassin	Volume total estimé (m ³)
1964-65	3	3,02	16%	85.000
1974-77	8	5,31	28%	(150.000)

On observe entre les deux périodes un accroissement de 50 % de la surface contrôlée et du volume total de ces açudes.

Comparé à la surface totale du bassin de 19 km², ce nombre d'açudes est courant dans cette région. Ces açudes sont de petite taille. Ils ont un volume moyen de 16.000 m³ et leur profondeur est généralement comprise entre 3 et 6 m. Notons que la somme de leurs volumes, qui est de 150.000 m³, est nettement inférieure aux volumes recommandés par MOLLE et CADIER (1991), qui est de 320.000 m³¹⁹.

¹⁹ Calculé de la façon suivante: 320.000 m³ = 0,5 x 5,31 x 120 x 1000
avec : 0,5 = 50% du volume écoulé annuel, selon les normes de la SUDENE
5,31 km² = surface contrôlée par ces açudes
120 = estimation de la lame écoulée moyenne annuelle
1000 = pour obtenir des m³.

■ L'açude ARACE :

Un açude appelé ARACE, de plus grande taille (1.400.000 m³ et 12 m de profondeur), retient les eaux du cours d'eau principal à 2 km en aval de l'exutoire du bassin de JUATAMA. Il contrôle un bassin de 23,3 km², soit 21 % de plus que le bassin représentatif.

Cet açude est correctement dimensionné par rapport aux normes de la SUDENE. Si l'on envisageait de l'utiliser pour une régularisation pluri-annuelle, ce qui serait tout à fait possible, compte tenu de sa profondeur, les mêmes normes permettraient alors de l'agrandir.

3.4.3 Dispositif de mesure

La figure 3.4.3 permet de situer le dispositif de mesure installé, lequel a été pratiquement identique pour les deux périodes, avec cependant quelques échelles supplémentaires pour contrôler les açudes nouvellement construits.

Ce dispositif était constitué de dix-huit pluviomètres, quatre pluviographes, une station météorologique, dix stations limnimétriques contrôlant les açudes et une station limnigraphique appelée "Cachoeira do Aracê", (cascade de l'Aracê), contrôlant les écoulements issus de l'exutoire du bassin. Cette station hydrométrique est stable et n'a pas présenté de problème majeur, tout comme le reste du dispositif. Les surfaces moyennes couvertes par pluviomètre et pluviographe sont respectivement de l'ordre d'un appareil pour 1 km² et 5 km².

3.4.4 Résultats obtenus.

Chroniques des lames écoulées :

TABLEAU 3.4.5 Chronique des termes du bilan hydrologique du bassin de JUATAMA

ANNEE	LAME PRECIPITEE (mm)	FREQUENCE DE LA PLUVIOMETRIE	LAME ECOULEE (mm)	COEFFICIENT D'ECOULEMENT
1963-64	1570	0,05	470	30%
1964-65	835	0,50	93	11,1
1974-75	1052	0,20	113	10,8
1975-76	646	0,70	8	1,2
1976-77	1171	0,15	133	11,4
MOYENNE Observée:	1055		163	15,5
MOYENNE Interannuelle:	820		120	14,6

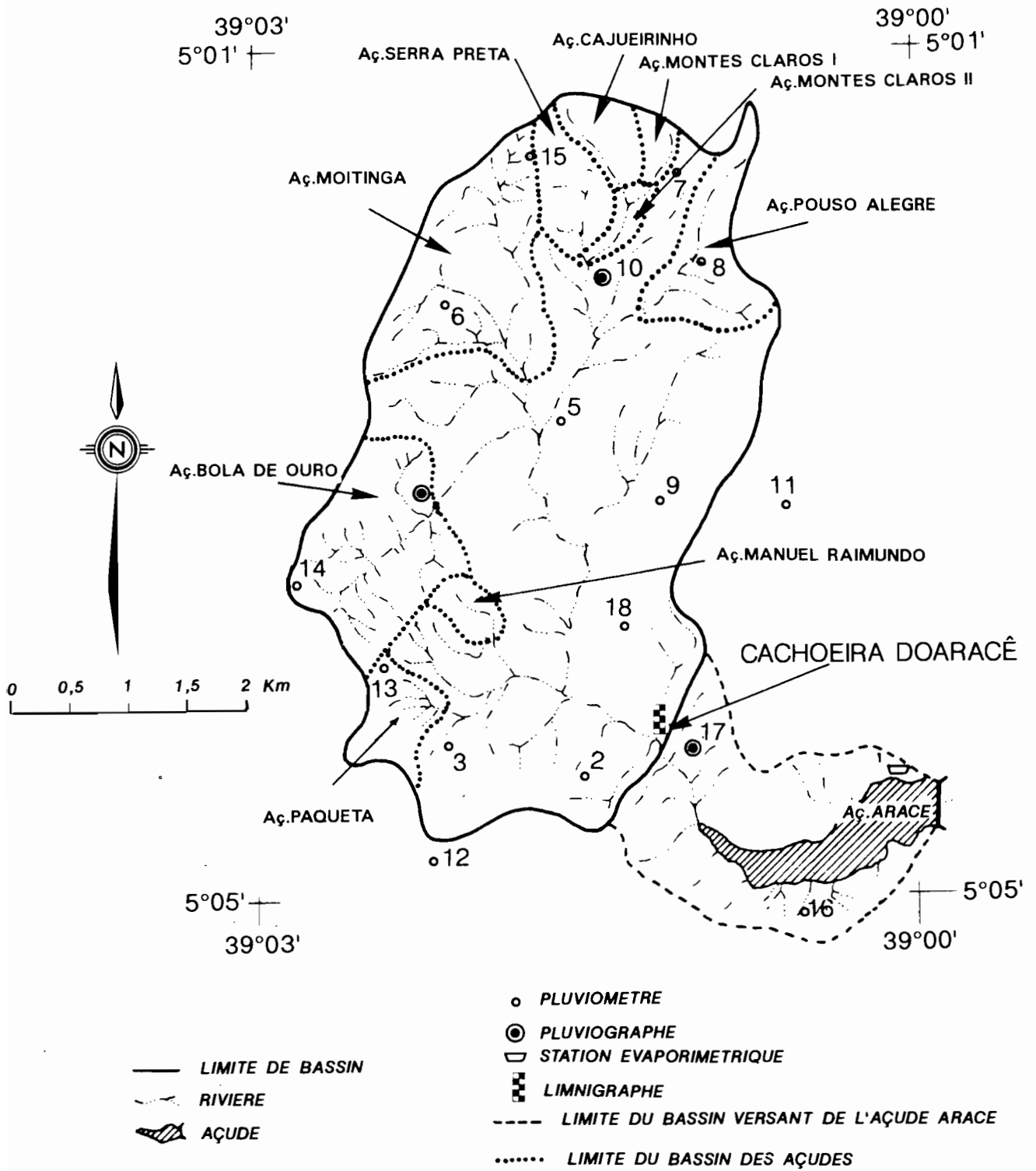


Figure 3.4.3 Réseau hydropluviométrique du bassin de JUATAMA.

Les totaux pluviométriques sont en général excédentaires. La moyenne des cinq années est de 1095 mm et dépasse de 33% la moyenne interannuelle, estimée à 820 mm. Au vu de ces chiffres, ce bassin ne peut plus être tout à fait qualifié de "semi-aride", tout au moins en se référant à cette période. La moyenne des écoulements annuels observés est de 163 mm et dépasse de 35 %, environ, la moyenne interannuelle dont les estimations varient entre 100 et 140 mm. La moyenne des coefficients d'écoulement annuels observés est de 15 % et est proche de sa valeur interannuelle, valeur élevée par rapport aux autres bassins du Sertão.

L'irrégularité des écoulements est évidemment bien plus grande que celle des précipitations et la relation entre les totaux annuels précipités et écoulés est assez lâche. Ainsi, les faibles écoulements observés en 1976, sont expliqués par son total annuel médiocre, mais aussi par les déficits pluviométriques concentrés à la fin de la saison des pluies, en avril, mai et juin, mois au cours desquels les coefficients d'écoulement sont les plus élevés. Ce comportement confirme le rôle des zones de rétention d'eau du schéma de toposéquence précédent.

Plus de la moitié des écoulements observés au cours de cette période de cinq ans provient de la seule saison des pluies 1964-65, dont la période de retour est supérieure à vingt ans et au cours de laquelle le coefficient d'écoulement annuel a atteint une valeur, tout à fait exceptionnelle, de 30 %.

Selon les publications du GJVJ (1965), 41 % seulement du volume écoulé au cours des années 1964 et 1965 provient du ruissellement direct, le reste étant de l'écoulement retardé et de base (au sens où l'entendait l'ORSTOM dans les années 60). Cette faible proportion du ruissellement direct met de nouveau en évidence le rôle des zones de rétention existantes sur ce bassin.

Les modèles ajustés par CADIER (1984) sont différents pour les deux périodes 1964-65 et 1975-77, celle de la deuxième période générant des écoulements inférieurs de 12 % à celui de la première. Ceci peut s'expliquer, partiellement, par la construction de nouveaux açudes entre les deux périodes, qui sont capables de stocker 3 à 4 % de l'écoulement.

Caractéristiques des crues.

Le tableau 3.4.6 résume les principales caractéristiques des crues du bassin de JUATAMA, en suivant les conventions adoptées pour le bassin de TAUA.

TABLEAU 3.4.6 Caractéristiques des crues du bassin de JUATAMA

Surface	Hydrogramme unitaire						
	Temps de montée	Temps de base	Débit maxi pour $L_s=1$ mm	$\frac{Q_{max}}{Q_{moy}}$	X_{10} mm	K_x moy	Q_{10} m^3/s
19,1 km ²	1 h	6 h	2,18 m ³ /s	2,45	33	1,88	62

La figure 3.4.4 montre la relation entre les pluies, les crues et l'indice de saturation préalable IK. Ce type de calage a été utilisé comme calage initial du modèle SUDENE/ORSTOM.

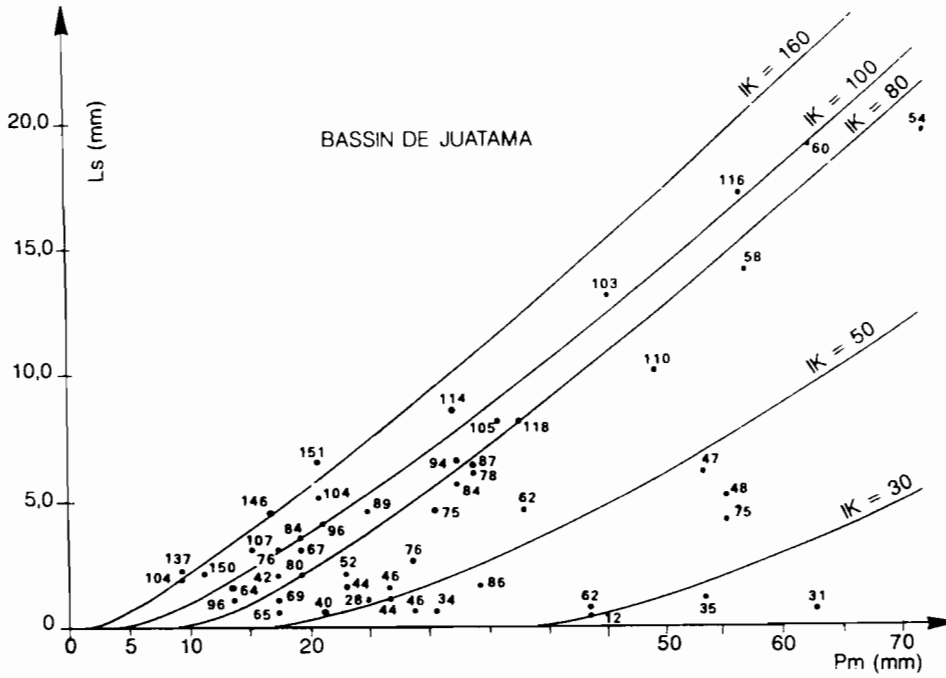


Figure 3.4.4 Liaison entre la pluie (Pm), l'écoulement des crues (Ls) et l'indice de saturation hydrique préalable du bassin (IK).

Lames écoulées caractéristiques

Le tableau 3.4.7 fournit les lames écoulées caractéristiques du bassin de JUATAMA pour les deux périodes d'observation du bassin, en suivant les conventions adoptées pour le bassin de TAUA.

TABLEAU 3.4.7 Lames écoulées caractéristiques du bassin de JUATAMA (mm)

Période	E C O U L E M E N T									
	L ₆₀₀	L(820)	DECEN. HUM. LA01	TRIEH. HUM. LA033	MEDIAN LA05	TRIEH. SEC LA067	DECEN. SEC LA09	L(3AC)	CRUE DECEN. X ₁₀	COEF ECOUL. MOYEN(%)
	(1)	(2)								
1964-66	68	140	358	157	93	35	8	85	38	17,7
1974-77	49	100	307	124	64	23	2	58	28	13,7
MODELE SYMPLES	-	120	350	-	62	-	10	-	-	14,6

A titre indicatif, nous rappelons les valeurs trouvées par CAMPELLO (1979) qui a ajusté le modèle SYMPLES, sur les mêmes données. Les résultats fournis par les deux modèles sont cohérents.

3.4.5 Conclusions et interprétation ; les acquis du Bassin de JUATAMA

Les lames écoulées et les coefficients d'écoulement de ce bassin sont les plus élevés de tous les bassins représentatifs étudiés. Cependant, ces fortes valeurs sont en grande partie dues à une pluviométrie supérieure de près de 300 mm à celle des autres bassins étudiés dans les zones géologiques de terrain cristallin.

Une fois ramenées à 600 mm, ces valeurs sont tout à fait modestes, inférieures, par exemple, à celles de la majeure partie des sous-bassins de TAUA. De plus, malgré le fort relief et la relative compacité de ce bassin, nous relevons des valeurs des temps de base des crues tout à fait comparables à celles des autres bassins de même surface, mais sans affleurement et de pente bien plus faible. Tout ceci nous amène à formuler et à étayer l'hypothèse d'un fonctionnement hydraulique complexe, certaines zones de rétention retardant probablement, avant d'être saturées, une part importante des écoulements en provenance des affleurements. L'ensemble est finalement beaucoup moins productif, sur le plan hydrologique, que l'on pourrait s'y attendre.

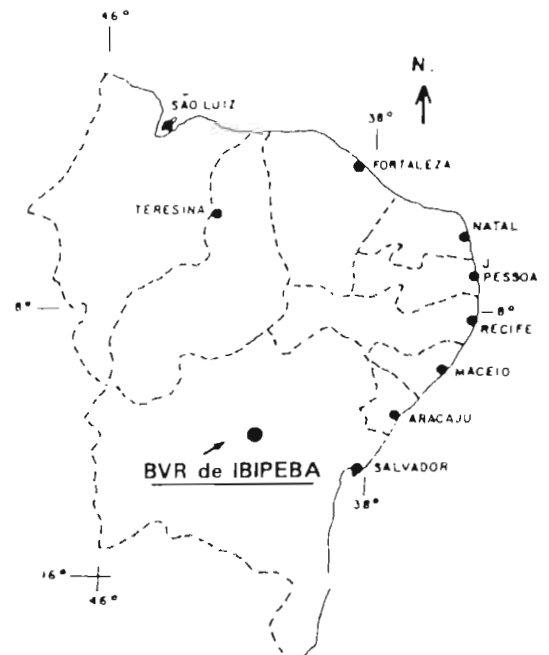
Il aurait été, bien sûr, souhaitable de pouvoir vérifier directement ces hypothèses à l'aide de mesures sur le terrain. On aurait pu, par exemple, concevoir un dispositif permettant de mesurer les variations d'écoulement entre l'amont et l'aval des principales zones probables de rétention d'eau, qui sont, rappelons-le, les sols podzoliques et les planosols. Ce dispositif pourrait être composé de tout petits bassins et devrait inclure le suivi des variations d'humidité du sol, de la piézométrie et des mesures de rabattement de nappes sur des profils stratégiquement répartis le long des versants.

Enfin, notons que la complexité des mécanismes et les contrastes des comportements hydriques des diverses zones identifiées rendra **difficile et hasardeuse la transposition des résultats** obtenus sur JUATAMA à d'autres bassins du même type, apparemment semblables, mais où les mêmes unités ou "acteurs" hydrologiques antagonistes existeront, bien sûr, mais dans des proportions différentes.

Cependant, les zones montagneuses de ce type sont courantes dans le Nordeste. Très peuplées, elles représentent un grand potentiel de ressources en eau de surface. Ceci renforce la nécessité de mieux cerner les mécanismes mis en évidence sur le BVR de JUATAMA, pour mieux gérer le stockage et l'utilisation de ces ressources.

3.5 LE BASSIN REPRESENTATIF D'IBIPEBA

Le bassin d'IBIPEBA se trouve à près de 1000 km au sud-ouest de tous les autres bassins. Il jouit d'un climat différent caractérisé par deux saisons des pluies. Situé entièrement sur un plateau calcaire, parfois karstique, il ne peut être directement comparé aux autres bassins sur formation sédimentaire qui avaient été étudiés par le GVI, qui sont eux, sur les rebords d'un plateau. Le bassin d'IBIPEBA est donc unique en son genre. Les écoulements y sont faibles et l'on constate des pertes d'eau importantes le long des cours d'eau.



BASSIN D'IBIPEBA



Paysage caractéristiques, de cambisols et latosols.

Une région riche, productrice de haricots.

3.5.1 Historique et description du bassin

Installé et géré par la SUDENE, le réseau hydropluviométrique de ce bassin qui contrôle une surface totale de 321 km², a fonctionné entre octobre 1976 et août 1981.

Son implantation a été effectuée dans le cadre de la planification de NOUVELOT (1974) pour représenter la "zone homogène" H₂₊, P₂, R₅, A₂₃ dont nous rappelons les caractéristiques :

H₂₊ Total des précipitations annuelles compris entre 400 et 600 mm avec un régime pluviométrique complexe caractérisé par une "double" saison des pluies.

P₂ Perméabilité du sous-sol faible à moyenne.

R₃ Relief assez fort (dénivelée spécifique entre 100 et 250 m).

A₂₃ Altitude variant entre 300 et 1000 m.

Une interprétation du zonage de NOUVELOT effectuée par HERBAUD *et al* (1989a) montre que les résultats du bassin d'IBIPEBA pourront être directement utilisés sur une surface de l'ordre de 60.000 km².

Une analyse plus détaillée des caractéristiques des cinq bassins installés met en évidence quelques distorsions et particularismes par rapport à l'approche globale et simplificatrice de la planification de NOUVELOT.

Climat et pluviométrie.

Situé dans la partie centrale de l'Etat de la BAHIA, à près de 1000 km au sud-ouest de Recife, le climat de la région d'IBIPEBA, toujours semi-aride, est bien différent de celui des autres bassins. Sa principale caractéristique est l'existence d'une saison des pluies (ou plutôt d'une saison pendant laquelle des pluies peuvent survenir...) beaucoup plus longue, s'étendant d'octobre à avril.

D'octobre à janvier, le bassin peut être en effet atteint par un système de perturbation en provenance de l'ouest qui provoque des orages et quelques pluies de mousson. Ces perturbations n'atteignent que très rarement les autres bassins, situés plus au nord. Entre janvier et avril les précipitations sont provoquées par le déplacement vers le sud de la Zone de Convergence Intertropicale qui est la seule qui atteint les autres bassins situés plus au nord.

Les mois de juin, juillet et août sont pratiquement les seuls pendant lesquels la probabilité de fortes précipitations susceptibles de provoquer un écoulement, est vraiment très faible.

La présence, dans cette région, de "Chapadas" qui sont des plateaux d'origine sédimentaire dominant les régions environnantes de plusieurs centaines de mètres, vient encore compliquer les choses en provoquant des effets d'écran et des micro-climats. Le réseau général pluviométrique et météorologique de cette région a une densité relativement faible qui rend parfois problématique la sélection d'un pluviomètre ou d'une station météorologique, à la fois de bonne qualité et représentatif du micro-climat étudié.

Un examen attentif des chroniques des précipitations mensuelles nous montre que l'une, l'autre ou encore les deux "saisons des pluies" mentionnées peuvent être décalées ou absentes. Les agriculteurs profitent des "bonnes années" pour effectuer deux récoltes annuelles dont les résultats restent toujours très aléatoires.

Le total pluviométrique moyen annuel sur ce bassin est estimé à **600 mm**, les valeurs décennales sèches et humides à 340 et 870 mm, le coefficient de variation C_V étant de l'ordre de 0,30 à 0,35, c'est à dire nettement plus faible que dans les autres bassins plus septentrionaux.

Curieusement, la distribution statistique des **totaux pluviométriques en 24 h** (et sans doute celle des intensités) ainsi que celle des débits calculés par des modèles hydropluviométriques à pas de temps journalier utilisant les pluviomètres de cette région ne sont pas très différentes de celles de la région SERTÃO NORD. Le total en 24 h de période de retour annuelle est de 65 mm et celui de fréquence décennale de 105 mm. Cela est à rapprocher, bien sûr, de l'origine principalement convective des fortes pluies.

Sur ce bassin, situé à plus de 11° de latitude sud, le **climat est tropical**, mais on commence à observer des variations climatiques nettement liées aux contrastes saisonniers entre l'été et l'hiver. Les principaux paramètres climatiques varient de la façon suivante :

- **Températures** : moyenne annuelle de 23,1°, juillet étant le mois le plus frais (21°); le maximum est atteint entre novembre et mars (25°). La moyenne mensuelle des maximums varie entre 26° et 36° et celle des minimums entre 12° et 22°.
- **Humidité relative** : les moyennes mensuelles varient entre 40 et 75 %, de manière logique en fonction des précipitations et des températures.
- **Vents** : ils sont faibles, de vitesse généralement inférieure à 1 m/s et de secteur Est-Ouest dominant.
- **Insolation** : la moyenne mensuelle varie entre 150 et 250 h, en fonction de la durée du jour et des précipitations. La moyenne générale calculée sur toute la période est de 7,1 heures par jour.
- **Evaporation**: les moyennes sur bac de classe A varient entre 4 et 8,5 mm/jour, d'une manière cohérente avec l'insolation, l'humidité et les précipitations. La moyenne générale de toute la période est de 5,8 mm/jour, soit un total annuel de 2.100 mm.

Géologie, sols et végétation

La région d'IRECE, grenier à haricot du Nordeste, où se trouve le bassin d'IBIPEBA, est célèbre pour la richesse de ses sols engendrés par son sous-sol calcaire, souvent karstique. Ce sous-sol appartient au groupe des **calcaires** lithographiques et des calcaires dolomitiques du groupe Una du protozoïque supérieur caractérisé par une nappe puissante souvent utilisée pour l'irrigation. Le relief est mou, avec des modulations de grande amplitude ; les sols sont des **cambisols**, des **latosols** et des **sols podzoliques** épais, perméables. Les premiers sont les plus fertiles et permettent la culture du haricot exporté ensuite vers d'autres régions.

Le cinquième nord-ouest du bassin est très différent : de relief beaucoup plus fort, le sous-sol est composé de **quartzites** et de **grès** qui affleurent souvent et engendrent des sols **lithosoliques** dystrophes sableux, pauvres et peu épais qui sont perméables mais restituent rapidement l'eau sous forme d'écoulement de base, à cause du sous-sol imperméable.

Dans les parties basses de cette zone se trouvent des **sables quartzeux** de plusieurs mètres d'épaisseur qui arrêtent la plus grande partie de l'écoulement des parties amont. Le sous bassin de LAGEDO DE BAIXO est situé complètement dans cette zone qui n'est pratiquement pas cultivée.

Le tableau 3.5.1 indique les vitesses d'infiltration au bout de six heures, mesurées par la méthode de Muntz. Chaque valeur correspond à la moyenne de trois essais réalisés sur les sites reportés sur la figure 3.5.1 (source : LEPRUN *et al* 1983).

TABLEAU 3.5.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin de IBIPEBA. Méthode de Muntz.

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES (mm/h)
IB 01	Arènes dystrophes	426
IB 02	Sols lithosoliques dystrophes	71
IB 03	Latosol rouge jaune d. e. - sol nu non cultivé	115
IB 04	Latosol rouge jaune d. e. avec végétation naturelle	150
IB 05	Latosol rouge jaune d. e. avec culture	246
IB 06	Sol podzolique	116
IB 07	Cambisol - avec peu de végétation naturelle	139
IB 08	Cambisol - avec culture	288

Le tableau 3.5.2 et la figure 3.5.1 présentent et résument les caractéristiques du sol, du sous-sol et de la végétation pour chaque sous-bassin.

TABLEAU 3.5.2 Principales formations géologiques, types de sol et végétation du bassin de IBIPEBA.

Formation Géologique	Calcaire			Quartzites	et Grès
	Dolomitique non karstique		Karstique		
Sol engendré et caractéristiques hydro-dynamiques	Cambisol. Il peut y avoir un faible ruissellement quand la pente est forte et le sol non labouré.	Cambisol et sol podzolique Aucun ruissellement	Latosol relief plan. Epaisseur de 2 a 3 m. Perméable. <u>Aucun ruissellement</u>	Sol lithologique associé des affleurements rocheux. Ce sol est très perméable, mais peu épais. L'écoulement de base sera rapide et important.	Sables Quartzeux très perméables qui arrêtent tout écoulement venant de l'amont
Occupation du sol	Souvent cultivé			Très peu cultivé	
Perméabilité(mm/h)	140 Végétation naturelle et culture	290 (cultivé)	115 à 250 selon la couverture végétale	71	426
Pourcentage par sous-bassin					
1. Lagoa Grande	27%	21%	32%	17%	3%
2. Lajedo de Baixo	-	-	-	100%	-
5. Faz. Isabel	69%	-	31%	-	-
6. Faz. Passagem	86%	-	14%	-	-
7. Lagoa do Canto	23%	44%	33%	-	-

(Adapté de LEPRUN *et al* 1983).

Morphologie : relief, forme des bassins et réseau de drainage

Le tableau 3.5.3 présente, avec les conventions habituelles, les caractéristiques morphométriques des différents bassins.

TABLEAU 3.5.3 Caractères morphométriques du bassin de IBIPEBA

Caractères Morphométriques	B a s s i n s				
	1.Lagoa Grande	2.Lajedo de Baixo	5.Fazenda Isabel	6.Fazenda Passagem	7.Lagoa do Canto
Taille et forme					
.Surface(km ²)	321	10,1	47	14,8	61
.Périmètre (km)	101	19	34	18	32
.Rectangle équivalent					
. Longueur (km)	43,1	6,8	13,8	6,8	10,2
. Largeur (km)	7,45	2,82	3,38	2,16	6,00
.Indice de compacité C	1,6	1,2	1,4	1,3	1,2
Pente et Relief:					
.Classe de relief	R ₅	R ₅	R ₄	R ₃	R ₃
.Altitude moyenne (m)	750	930	710	730	785
.Indice global de pente (m/km)	9,6	36,5	10	13,8	4,6
.Dénivelée spécifique (m)	172	160	70	53	36
Réseau de drainage:					
.Densité de drainage (km/km ²)	0,57	0,48	0,94	0,69	0,07
.Rapport de longueur	1,94	-	1,73	-	-
.Rapport de confluence	3,02	-	3,00	2,65	-

Représentativité des différents sous-bassins

Les différents sous-bassins du BVR d'IBIPEBA ont été choisis pour représenter les principales unités géologiques et pédologiques existantes dans cette région. On en distingue trois principales :

- Les bassins 5 et 6 sur **calcaire dolomitique non karstique** sont couverts par des cambisols et latosols. Ils sont caractérisés par un relief faible (D_s de 50 à 70 m) et des densités de drainage variant entre 0,7 et 1 km/km².
- Le bassin 7 sur **calcaire lithographique karstique**, est caractérisé par un relief encore plus faible ($D_s = 36$ m) et surtout par un réseau hydrographique presque inexistant dont la densité de drainage est inférieure à 0,1 km/km².
- Le bassin 2, sur **quartzites et grès** est caractérisé par un fort relief (dénivelées spécifiques D_s de l'ordre de 200 m) et une densité de drainage de l'ordre de 0,5 km/km².
- Le bassin principal n° 1 intègre toutes ces unités. Des pertes en eau importantes sont constatées par rapport aux contributions des différents bassins situés en amont. Ces pertes sont dues à la présence d'un lac sur le parcours de l'émissaire principal et probablement à des phénomènes karstiques.

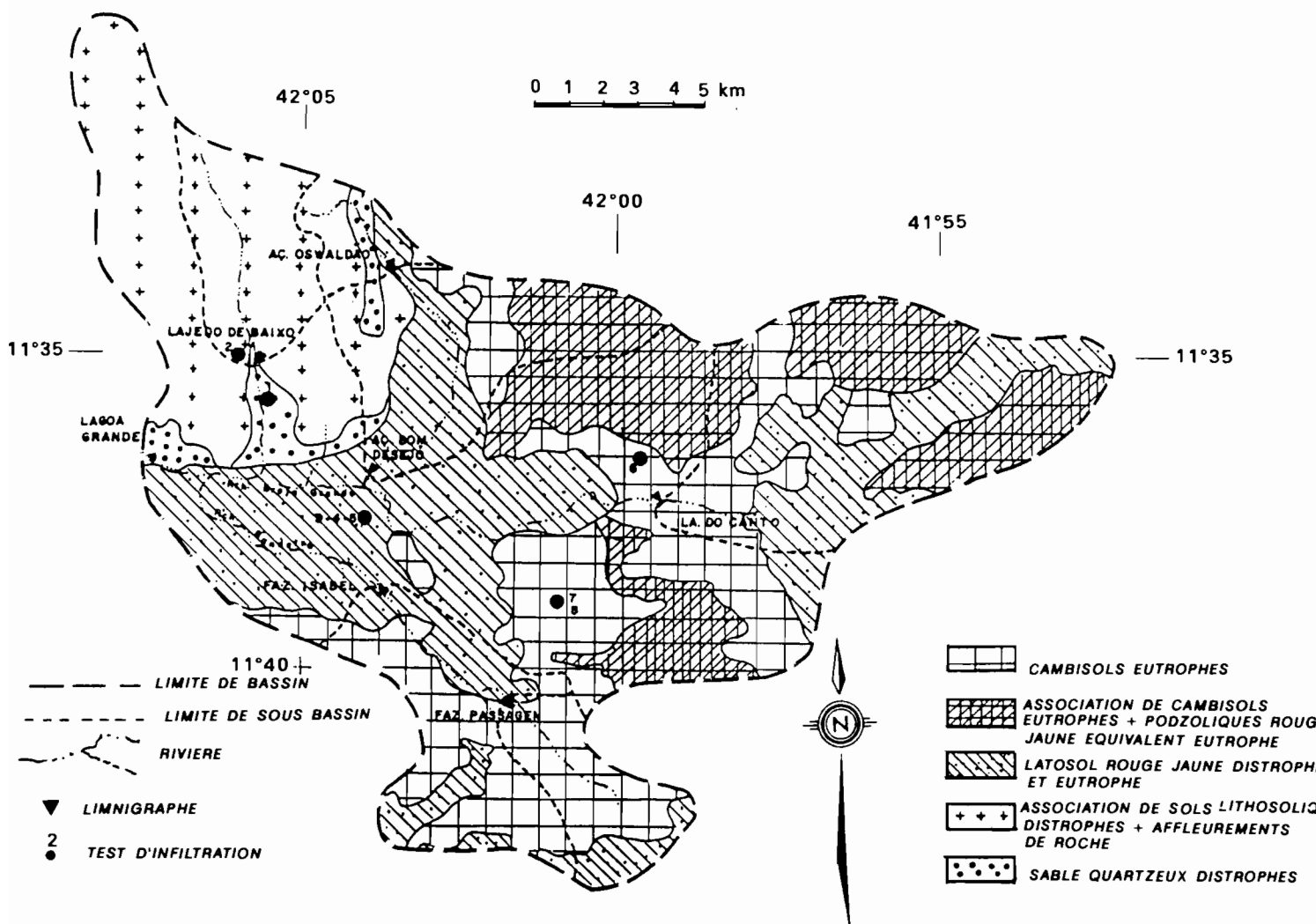


Figure 3.5.1 Carte des sols du bassin d'IBIPEBA

3.5.2 Dispositif de mesure

La figure 3.5.2 montre le dispositif installé qui a fonctionné entre septembre 1976 et août 1981.

Ce dispositif était composé de 49 pluviomètres, six pluviographes, une station météorologique, cinq stations limnigraphiques et deux stations limnimétriques sur petit barrage.

La surface moyenne couverte par pluviomètre sur l'ensemble du bassin, est d'un appareil pour $6,5 \text{ km}^2$, mais atteint un pluviomètre pour 2 km^2 dans les zones les plus denses.

Ce bassin a fait l'objet de 5 rapports partiels de campagne PEREIRA (1978), ZELAQUETT (1980), LINS (1982), ASSUNÇÃO (1982 et 1984) et d'un rapport de synthèse final (HERBAUD *et al*, 1989a) dont nous avons extrait la plupart des résultats présentés après.



Figure 3.5.2 Réseau hydropluviométrique et açudes du bassin d'IBIPEBA.

3.5.3 Résultats obtenus

Chronique des lames observées

Le tableau 3.5.4 présente les totaux annuels des lames précipitées et écoulées sur les différents sous-bassins. Le bassin n° 7 n'a jamais coulé et il n'a pas été possible d'y observer des écoulements significatifs ainsi que sur les bassins des açudes 3 et 4, non mentionnés jusqu'ici, qui, de plus, présentent probablement des fuites très importantes.

TABLEAU 3.5.4 Chronique des précipitations et des écoulements sur le bassin de IBIPEBA

Année	1 Lagoa Grande		2 Lajedo de Baixo		5 Faz. Isabel		6 Faz. Passagem		Fréquence Estimée
	Prec.	Ecoul.	Prec.	Ecoul.	Prec.	Ecoul.	Prec.	Ecoul.	
1976-77	-	-	-	-	632,9	(8,0)	646,1	(11,7)	0,45
1977-78	1.002,5	4,4	1087,2	30,5	1.050,4	18,05	1058,4	30,6	0,04
1978-79	737,7	2,02	800,3	39,1	700,4	1,75	717,1	2,04	0,30
1979-80	753,9	3,85	657,9	19,8	793,0	18,5	843,3	32,7	0,20
1980-81	695,5	1,32	691,2	7,2	728,6	6,3	739,1	15,2	0,30
Moyenne	797,4	2,90	809,2	24,2	781,1	10,52	800,8	18,4	
L600	-	0,7	-	18	-	8	-	14	

On constate que tous les totaux pluviométriques des cinq années observées sont **excédentaires**. L'année 1977-78 est la plus forte de la période et présente un total supérieur à 1000 mm, d'une période de retour de l'ordre de 25 ans. La moyenne des cinq ans observés atteint presque 800 mm, valeur significativement supérieure à la moyenne interannuelle, qui est estimée sur ce bassin à 600 mm.

Comme on pouvait s'y attendre, les écoulements moyens observés sont supérieurs de 40 à 70% à la moyenne interannuelle L₆₀₀, sauf pour le plus grand bassin n° 1 de LAGOA GRANDE pour lequel le dépassement est de 600%! Mais dans ce cas, la faiblesse des coefficients d'écoulement diminue la signification des écarts observés. Les écoulements de l'année 1977-78 sont élevés, mais pas autant que son total pluviométrique exceptionnel aurait pu le laisser prévoir.

Notons également l'**extrême hétérogénéité spatiale et temporelle** des écoulements, entre les différentes parties du bassin. Ainsi, en 1978/79 les écoulements du bassin n° 2 (LAGEDO DE BAIXO) sont **quinze ou vingt fois plus forts** que ceux des bassins 5 et 6 (FAZ. ISABEL et PASSAGEM), alors qu'ils leurs sont inférieurs les deux années suivantes.

Les coefficients d'écoulement sont faibles, de l'ordre de 1 à 3% sur les bassins qui coulent le plus et de 0,1 % seulement sur le bassin principal. Le ruissellement, très aléatoire, survient au cours de quelques rares crues, signe caractéristique de l'irrégularité des régimes.

Aucun écoulement n'a été observé entre 1976 et 1981 sur le bassin n° 7 (LAGOA DO CANTO); nous avons appris cependant que plusieurs crues y avaient été observées au cours de la saison des pluies exceptionnellement abondante de 1984-85, bien après la fermeture du bassin d'IBIPEBA. Ceci pose le problème de la durée des observations, qui doit être très longue sur ces bassins irréguliers.

Caractéristiques des crues

Le tableau 3.5.5 contient les caractéristiques des crues des différents bassins, en utilisant les mêmes conventions que pour le bassin de TAUA.

TABLEAU 3.5.5 Caractéristiques des crues du bassin de IBIPEBA.

Bassin	Surface km ²	Hydrogramme unitaire						
		Temps de monté montée	Temps de base base	Débit Maxi pour L _S =1mm	Q _{max} Q _{moy.}	X ₁₀ (mm)	K moy	Q ₁₀ m ³ /s
Lagoa Grande	321,5	7 h	20 h	10,4 m ³ /s	2,3	1,0	7,15	7,0
Laj. de Baixo	19,1	0h20'	1 h	12,0 m ³ /s	2,3	2,0	4,42	9,0
Fz. Isabel	46,8	0h40'	3h20'	11,7 m ³ /s	3,0	12	4,62	55,0
Fz. Passagem	14,8	0h30'	2h10'	5,9 m ³ /s	3,1	15	3,20	48,0

Lames écoulées caractéristiques

Le tableau 3.5.6 contient les lames écoulées caractéristiques des différents bassins, en utilisant les mêmes conventions que pour le bassin de TAUA.

TABLEAU 3.5.6 Lames écoulées caractéristiques (mm) du bassin de IBIPEBA

SOUS-BASSIN	L ₆₀₀	MOYENNE* L(p)	E C O U L E M E N T						CRUE DECEN. X ₁₀	COEFIC. ECOUL. MOYEN (%)
			DECEN. HUM. F = 0,1	TRIEN. HUM. F = 0,33	MEDIANE F = 0,5	TRIEN. SEC F = 0,67	DECEN. SEC F = 0,9	L 3AC		
Lagoa Grande	(1)	(1)	?	1	0	0	0	0	1	0,15
Lajedo do Baixo	(18)	(23)	?	?	15	?	?	22	2	3,8
Faz. Isabel	(8)	(9)	19	10	6	(3)	0	5	12	1,5
Faz. Passagem	(14)	(16)	34	16	9	(3)	0	6	15	2,7
Lagoa do Canto	?	?	?	0	0	0	0	0	?	?

* L_(p) est supérieur à L₆₀₀ car, bien que la pluviométrie annuelle moyenne du bassin soit estimée à 600 mm, le coefficient climatique C de cette région a été estimé à 1,15 (formule L_(p) = C.e^{A(P-600)}.L₆₀₀).

3.5.4 Conclusions: Les acquis du bassin d'IBIPEBA

L'étude du Bassin Représentatif d'IBIPEBA a permis de mettre en évidence quelques traits marquants des régimes hydrologiques de cette région :

3.5.4.1 Les modules annuels.

Les écoulements annuels du bassin d'IBIPEBA sont caractérisés par :

- a) **Leur faiblesse** : les rendements annuels moyens sont toujours inférieurs à 2 %.
- b) **L'extrême irrégularité des régimes** : les écoulements annuels sont nuls une année sur deux ou une année sur cinq selon les bassins. Autre signe d'irrégularité, la lame de la crue décennale est toujours supérieure au module, à l'exception du bassin n° 2 de LAGEDO DE BAIXO, dont l'écoulement provient surtout d'un écoulement de base "rapide".

3.5.4.2 Principaux régimes hydrologiques

On a pu mettre en évidence trois comportements hydrologiques principaux :

- . Les zones sur **calcaires dolomitiques non karstiques** dont les parties couvertes de cambisols ruissellent. Les lames écoulées L_{600} des petits bassins de cette zone varient entre 10 et 20 mm et sont donc trois à six fois plus faibles que dans les zones climatiques analogues du socle cristallin.
- . Les zones sur **calcaires lithographiques karstiques** sur lesquels se développent des latosols, des cambisols et des sols podzoliques. Dans ces zones le réseau hydrographique est très peu développé et **l'écoulement est pratiquement nul**. Des phénomènes de karst y entraînent la disparition brutale dans des dolines des quelques rares cours d'eau qui arrivent à se former.
- . Des zones sur **quartzites et grès** caractérisées par un fort relief et des sols sableux, peu profonds qui s'épaississent beaucoup dans les parties basses de pente plus faible. **Le ruissellement pur est très faible**. On y observe surtout un **écoulement retardé** par les sols, dont le tarissement peut durer plusieurs mois.
Les sables épais situés en aval arrêtent totalement ou partiellement les écoulements. Il est difficile de pousser plus loin l'analyse du comportement de ce bassin, unique en son genre parmi l'ensemble de B.V.R. étudiés dans le Nordeste. Il semble cependant clair que les tentatives de transposition de son régime vers d'autres bassins devront tenir compte du rôle et des proportions relatives du sol **sableux épais** existant dans la partie aval.

3.5.4.3 Le paradoxe des crues :

Comme on pouvait s'y attendre les lames des crues des zones sur calcaire non karstiques, sont deux ou trois fois plus faibles que celles des zones comparables situées sur socle cristallin. Nous constatons, par contre, que le rapport entre ces crues et les lames moyennes annuelles y est nettement plus élevé.

Par ailleurs les temps de base des deux bassins situés dans cette zone sédimentaire, sont inférieurs de 30 à 40% à ceux de bassins analogues, de même surface, sur terrains cristallins. Ceci peut être interprété comme un signe que seule une partie du bassin contribue à la genèse des fortes crues.

RODIER (1979) est arrivé à des conclusions similaires au sujet des petits bassins perméables du Sahel Africain.

Enfin, compte tenu de la faiblesse des lames de ces crues, on peut craindre que les crues vraiment exceptionnelles soient proportionnellement plus élevées. Par exemple, il est probable que le rapport entre la crue centennale et la crue décennale soit plus fort dans la partie sédimentaire que dans la partie cristalline.

Tout ceci nous amène aux conclusions, apparemment paradoxales, suivantes :

- . Pour des bassins de même surface et de même morphologie, les crues de cette région seront moins importantes que dans les zones cristallines analogues.
- . Cependant, pour un même volume annuel écoulé, il faudra craindre des débits de pointe plus élevés.

3.5.4.4 Les pertes dans le réseau hydrographique

On constate des pertes importantes entre les sous-bassins et le bassin principal. Ainsi, la somme des volumes écoulés aux deux stations 2 et 5 qui contrôlent, au total, une surface de 66 km² est pratiquement égale au volume observé à l'exutoire du grand bassin n° 1 de 321 km².

HERBAUD *et al* (1989a) ont essayé d'estimer les pertes dans le réseau hydrographique en supposant que les lames écoulées sont constantes pour une même unité de sol :

TABLEAU 3.5.7 Estimation des pertes sur le réseau hydrographique du bassin de IBIPEBA

	Volume	Lame écoulée
Écoulement que les différentes unités de sol devraient produire	2.700.000 m ³	8,5 mm
Écoulement observé à l'exutoire du bassin principal de 321 km ²	900.000 m ³	2,9 mm
Pertues estimées sur le réseau		

hydrographique	1.800.000 m ³	5,6 mm
----------------	--------------------------	--------

Ces pertes, estimées à 1.800.000 m³, peuvent se produire le long du réseau de 45 km de chenaux principaux de deux façons :

- . soit d'une manière progressive par infiltration dans les berges et alimentation des aquifères. Ceci a surtout lieu dans les zones sableuses et épaisses qui bordent 4 km de ces chenaux ;
- . soit d'une manière plus brutale, quand les rivières disparaissent dans des dolines ou se perdent dans le lac situé immédiatement en amont de la station principale d'IBIPEBA.

Cette estimation des pertes, probablement discontinues, est difficilement extrapolable vers d'autres bassins, mais son importance, qui dépasse le module, permet de prendre la mesure du phénomène. Il est regrettable que l'étude de ce bassin n'ait pas été couplée avec une étude hydrogéologique.

3.5.4.5 L'amélioration des connaissances hydrologiques régionales

Ce type d'étude sur petit bassin est unique en son genre dans cette région. Il permet de mieux comprendre les mécanismes de genèse de l'écoulement, mécanismes que les stations du réseau général, installées sur des bassins de taille nettement supérieure, ne permettent pas d'appréhender. En effet, sur ces grands bassins, les pertes mentionnées plus haut sont associées à des résurgences et à des restitutions du débit de base en provenance des aquifères, tout ceci se produisant dans des unités géologiques différentes.

Les valeurs des écoulements du bassin d'IBIPEBA ne sont cependant que **difficilement transposables à d'autres bassins**. Tout d'abord à cause des hétérogénéités et discontinuités spatiales qui font que ce sont davantage les caractéristiques des zones de rétention d'eau que celles des zones de production qui expliquent le mieux les variations des régimes. Ensuite parce que le bassin d'IBIPEBA est seul de son espèce dans cette zone climatique. Les autres bassins sur terrains sédimentaires étudiés sont, en effet situés, dans une autre zone climatique, celle du SERTÃO NORD, dans un contexte géologique et physiographique différent et n'ont été suivis que peu de temps, avec d'autres techniques de mesure et d'interprétation.

Pour conclure sur une note pratique, nous pouvons dire que les petites rivières de cette région seront en général **peu propices à la construction de petits barrages**, à cause d'abord de la faiblesse et de l'irrégularité des écoulements, ensuite parce que l'étanchéité de ces barrages est en général insuffisante et enfin, parce que l'exploitation des eaux souterraines concurrence le stockage par petite retenue collinaire ou açudes.

3.6 CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE:

Information apportée par les différents bassins

Chaque bassin permet, à sa manière, de mieux comprendre ou de mieux appréhender tel ou tel aspect des comportements hydrologiques mais aussi, souvent, de mettre en évidence une complexité insoupçonnée des mécanismes.

C'est le cas du bassin de **SUME**, dont les résultats ont permis, d'une part de proposer une quantification de l'effet de la végétation sur l'écoulement, mais ont aussi montré l'existence de cheminements complexes de l'eau dans le sol. Les écoulements relativement faibles de ce bassin peuvent s'expliquer par la présence de sols podzoliques sableux et/ou de sols vertiques ou de zones alluviales relativement importantes.

Les écoulements relativement faibles constatés sur le bassin du **RIACHO DO NAVIO** peuvent s'expliquer par la présence de régosols sableux et épais sur ce bassin.

Le bassin de **JUATAMA** permet de mieux comprendre le fonctionnement d'une zone de fort relief où des affleurements rocheux surplombent des glacis détritiques, où s'infiltré, probablement, une grande partie du ruissellement.

Parmi tous les bassins représentatifs situés sur le socle cristallin, **TAUA** est, sans doute, celui qui apporte l'information la plus complète au sujet des bassins de surface comprise entre un et dix km². Les données recueillies sur quatorze petits bassins différents ont pu être utilisées pour ébaucher une typologie des bassins de cette région. Les écoulements annuels y sont, en général plus élevés que dans les bassins précédents. La dégradation de la surface du sol et de la végétation ou la présence de solonetz sont des facteurs qui favorisent l'écoulement. Au contraire, la présence de sols vertiques ou de végétation dense le diminue. Les données de **TAUA** ont pu être également utilisées pour étudier les variations des lames écoulées annuelles en fonction de leur surface ou de l'importance des açudes présents à l'intérieur du bassin.

Enfin les bassins **d'IBIPEBA** et ceux situés dans le bassin du **Val du JAGUARIBE**⁹, fournissent quelques éléments sur le comportement des bassins situés sur un sous-sol d'origine sédimentaire. Leurs sols sont en général plus épais et engendrent des écoulements beaucoup plus faibles et plus difficilement prévisibles que les bassins situés sur le socle cristallin. Leur irrégularité est plus grande et l'on y observe parfois des phénomènes de Karst.

Perméabilité des différents sols

Le tableau suivant résume les résultats des mesures de perméabilité effectués avec la méthode de MUNTZ sur tous les bassins, et permet de comparer la perméabilité des différents sols. Nous utiliserons plus loin les données de ce tableau pour proposer un regroupement et une typologie des sols en fonction de leur comportement hydrodynamique¹⁰.

⁹Dont les résultats sont présentés en annexe

¹⁰Les données de ce tableau devront être utilisées avec précaution, d'une part parce que la méthode de mesure utilisée ne permet pas de rendre compte de certains aspects hydrodynamiques comme les "effets de surface" ou les infiltrations latérales sur les planosols, d'autre part à cause du petit nombre de mesures effectuées pour certains types de sols qui ne garantissent pas une représentativité pour tout le Nordeste.

Tableau 3.6.1 Perméabilité de différents sols du Nordeste selon LEPRUN *et al.* (1983)

SOLS	Valeur moyenne de la perméabilité (mm/h)	Ecart type	Perméabilité
Solonetz (SS)	8,3	-	De très lente à lente
Vertisol (V)	23,6	-	De très lente à modérée
Brun non calcique (NC)	31,9	9,3	De lente à modérée
Lithosolique (R)	84,0	43,8	De modérée à rapide
Régosol (RE)	91,7	39,6	De modérée à rapide
Planosol (PL)	94,1	56,9	De modérée à lente
Latosol (LA)	170,6	-	De rapide à très rapide
Podzolique eutrophe (PE)	181,0	135,5	De modérée à rapide
Cambisol (CA)	213,4	-	De modérée à rapide
Sable quartzeux (AQ)	425,8	-	De très rapide à rapide.

Quelques ordres de grandeur pour caractériser les principaux comportements hydrologiques de cette région.

Les informations recueillies sur tous ces bassins montrent bien toute la complexité et la variabilité, dans l'espace et dans le temps, de leurs régimes hydrologiques dans cette région semi-aride. Quelques chiffres peuvent rendre compte des divers aspects de ces régimes :

Écoulement annuel moyen : valeurs et variations.

Dans ces régions semi-arides, les écoulements représentent une faible partie des pluies, 20 à 100 mm dans la plupart des cas, soit 3 à 15 % des précipitations. Les coefficients annuels moyens d'écoulement varient beaucoup d'un bassin à l'autre. Mais, mis à part le cas de l'açude LUZIMAR et des micro-bassins érodés de SUME, tous les coefficients sont inférieurs à 15 % :

- . 10 à 15 % pour les petits bassins qui "coulent" beaucoup;
- . 2 à 8 % pour la majorité des bassins, qui sont en général plus grands et dont certaines zones ne produisent que peu d'écoulement, ou retiennent parfois l'écoulement en provenance d'autres zones.
- . 0 à 2 % pour les bassins des zones sédimentaires.

- Variation de la lame annuelle en fonction de la pluviométrie.

Le module augmente (ou diminue) d'environ 40 % pour chaque 100 mm supplémentaire (ou en moins) de la pluviométrie annuelle moyenne.

- Variabilité dans le temps des écoulements.

Au cours de l'année, ces écoulements surviennent généralement en très peu de temps, en quelques jours ou quelques semaines tout au plus.

D'une année sur l'autre les écoulements s'écartent considérablement de leur moyenne.

Ainsi la valeur annuelle décennale humide est de l'ordre du triple de la moyenne, la triennale humide est proche de la moyenne, la triennale sèche (ou écoulement garanti deux ans sur trois) n'est plus que le quart de la moyenne. Quant à la lame décennale sèche, il est nul ou vraiment très faible .

Circonstance aggravante, les années excédentaires ou déficitaires semblent arriver par "paquets". Ceci est confirmé par des coefficients d'autocorrélation de MARKOV des séries pluviométriques annuelles qui sont le plus souvent compris entre 0,10 et 0,30, pour l'ensemble du Nordeste. En terme d'écoulement ceci signifie que, tous les vingt ans, surviendra une période déficitaire de trois années consécutives au cours de laquelle la somme des écoulements ne dépassera pas la moitié de la moyenne annuelle.

Cette variabilité extrême résulte de la conjugaison de deux facteurs :

- . La grande variabilité des précipitations. Les coefficients de variation CV des totaux annuels sont élevés, supérieurs à 0,3 voire à 0,4. Le rapport K_3 entre les hauteurs de fréquence décennale sèche et humide, est particulièrement élevé, pouvant dépasser 3. A l'irrégularité de la distribution des totaux annuels, vient s'ajouter celle de la distribution saisonnière des quelques pluies convectives qui engendrent la majeure partie des débits. Ainsi, un même total de pluies annuel peut provoquer des écoulements très différents.
- . L'écoulement représente la partie de la pluie qui n'est pas interceptée. Ainsi, un coefficient d'écoulement de l'ordre de 10 % correspond à un déficit d'écoulement de 90 %. Une faible variation relative de ce déficit entraînera une variation relative bien plus importante des écoulements. Or les facteurs objectifs susceptibles de modifier ce déficit ne manquent pas : rétention puis évaporation de l'eau dans des flaques ou dans de petites poches ou nappes perchées; variation des intensités permettant, ou non, une infiltration; modification des états de la surface du sol ou de la végétation, etc.

- Part du ruissellement dans l'écoulement total :

La plus grande partie des écoulements de ces zones semi-arides provient de ruissellement direct ou retardé directement lié aux crues. Le volume de la crue de fréquence décennale est en général compris entre 30 % et 150 % du module annuel.

QUATRIEME PARTIE

4. TRANSPOSITION DES ECOULEMENTS ANNUELS

"La transposition des résultats est donc une opération qui devrait être absolument générale, chaque fois que l'on aménage un bassin représentatif" (J. RODIER, 1982).

La mise au point d'une méthode simple et pratique permettant la transposition des écoulements annuels vers des bassins dépourvus d'information hydrologique est l'objet de ce chapitre.

4.1 OBJECTIFS ET STRATEGIE

Ou comment établir des règles de transposition.

Il est important, maintenant, de chercher à établir des **règles pratiques** qui permettront de préciser les ordres de grandeur des paramètres caractéristiques des régimes hydrologiques, en fonction des particularités de chaque bassin. Il s'agit d'essayer de généraliser, sur l'ensemble des 800.000 km² du Nordeste semi-aride, les typologies de bassins établies localement dans les micro-régions des bassins de TAUUA, SUME, RIACHO DO NAVIO, JUATAMA et IBIPEBA.

L'élaboration de ces règles pratiques concernera surtout la **transposition des écoulements moyens annuels**, de leur courbe de distribution fréquentielle. Nous exposerons ensuite, dans le chapitre 5 les résultats que nous avons obtenus pour transposer les caractéristiques de la **crue décennale**. La connaissance des tarissements ne présente que peu d'intérêt dans cette région où toutes les rivières s'assèchent tous les ans. Nous ne disposons malheureusement pas de données suffisantes au sujet de la qualité de l'eau, de la quantité de sels et de sédiments transportés par les rivières, thèmes qui correspondent à des problèmes et à des obstacles importants pour l'utilisation rationnelle des ressources hydriques du Nordeste.

Nous verrons que la **stratégie employée** pour atteindre ces objectifs n'est pas simple et nécessitera l'emploi d'un certain nombre d'artifices.

Principes de base de notre démarche

Résumons les principes essentiels de notre démarche :

- a) **Les modules annuels et les crues seront étudiés séparément.** En effet, les modules correspondent à la somme d'un grand nombre d'événements, pluie x débit, dont le barycentre ou dominante correspond à des crues de moyenne importance, qui sont les plus fréquentes. Au contraire, la crue décennale correspond au ruissellement d'une averse exceptionnelle. Autre différence : les caractéristiques des crues varient en fonction du temps de transfert hydraulique des volumes écoulés dans le réseau de drainage, paramètre qui n'influence pas les modules.
- b) On s'appuiera sur une **modélisation systématique des comportements hydrologiques** des bassins versants représentatifs qui permettra de s'abstraire des particularités climatiques des périodes observées. Nous avons constaté, sur plusieurs bassins versants, la nécessité de réaliser cette correction.
- c) On utilisera **toute l'information disponible** qui est encore, à notre sens, très insuffisante :
 - * Information fournie par les bassins versants représentatifs.
 - * Information fournie par le réseau général hydropluviométrique de base du Nordeste. On utilisera en particulier l'information fournie par les grands bassins qui intègrent les écoulements des petits bassins qui le composent.
 - * Information et résultats fournis par les parcelles de ruissellement des instituts de recherche agronomique.
 - * Mesures d'infiltration des différents sols ; information, expérience et conseils des pédologues et botanistes.
 - * Connaissance des mécanismes hydrologiques acquise au Brésil ou dans d'autres régions comparables du globe.

Principales étapes à accomplir

Les principales étapes de notre démarche, qui semble s'apparenter à une *course d'obstacles*, découlent des principes que nous venons d'énoncer et des difficultés qu'il a fallu surmonter. Ces étapes sont les suivantes :

- a) **Collecte, traitement, analyse et modélisation** de toute l'information hydropluviométrique utilisable relative aux comportements des petits bassins (source d'information N°1).
- b) Détermination des **zones climatiques** à l'intérieur desquelles ces modèles hydropluviométriques sont valables. Sélection de pluviomètres représentatifs de chaque zone (source d'information N°2).
- c) **Interprétation des résultats** : établissement d'une typologie des bassins étudiés et essai d'établissement de **règles de transposition** des paramètres hydrologiques vers des bassins dépourvus d'information hydrologique. Il s'avère difficile de passer directement d'une typologie qualitative des bassins à des règles permettant une détermination quantitative des écoulements annuels. Pour cela, les deux étapes supplémentaires d) et e) seront nécessaires.

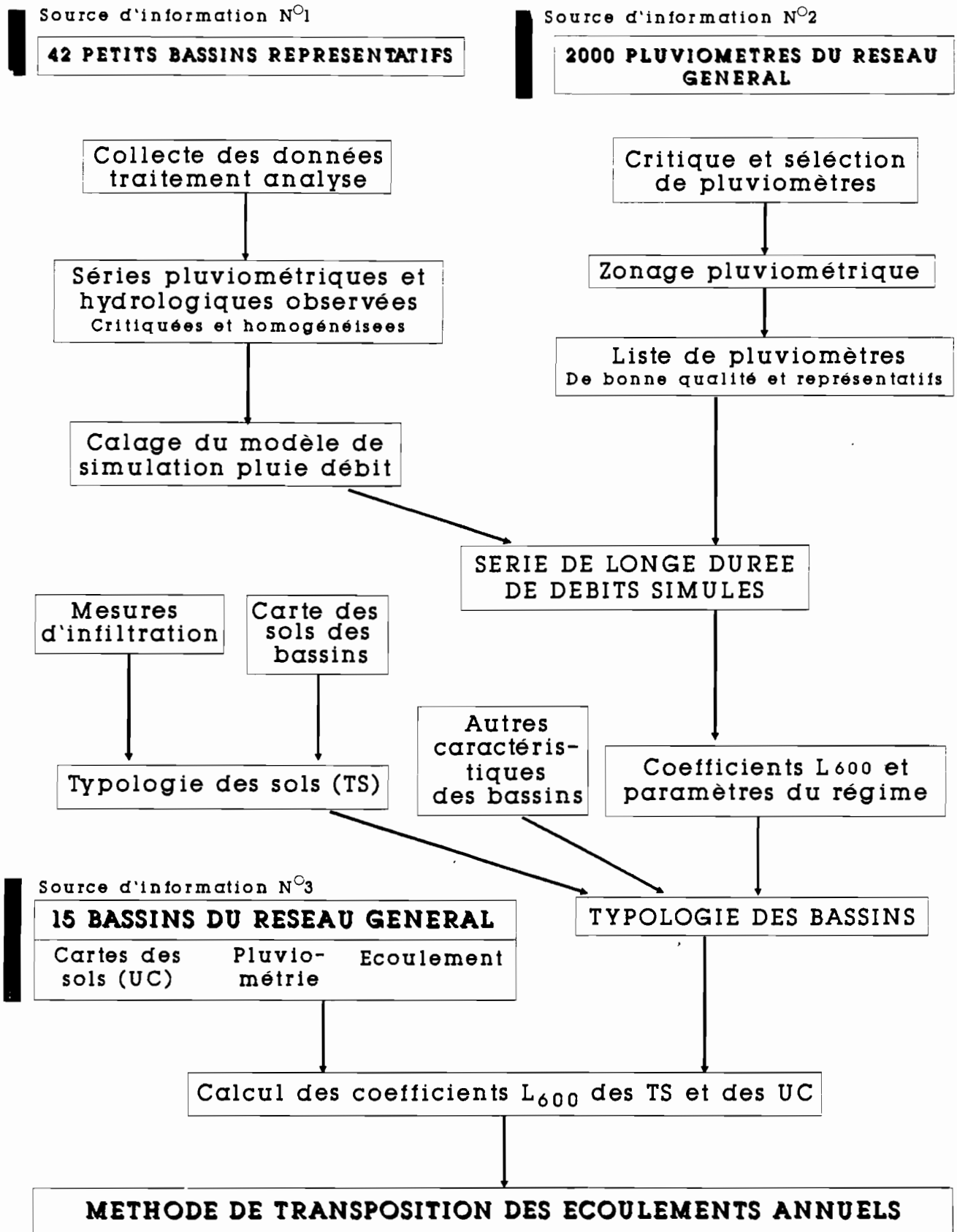


Figure 4.1.1 Principales étapes de l'élaboration d'une méthode de transposition des écoulements annuels dans le Nordeste du Brésil

d) **Utilisation d'information complémentaire** fournie d'abord par les stations hydrométriques du réseau général installées dans la zone semi-aride pour calculer les valeurs moyennes des écoulements des divers types de sol. Puis utilisation de toute l'information disponible, en provenance, notamment, d'instituts de recherche agronomique, du Programme "Açude" ou de résultats de recherches de tout type, afin de proposer des corrections qui seront nécessaires quand la végétation, l'état de la surface du sol ou la densité d'açudes s'écarteront de la normale (source d'information N°3).

e) **Validation** de la méthode de transposition hydrologique proposée, sur les bassins versants représentatifs de la SUDENE, qui n'ont pas été utilisés pour les calculs.

L'organigramme de la figure 4.1.1 montre l'enchaînement des principales étapes.

4.2 MODELISATION HYDROLOGIQUE DES PETITS BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS DU "NORDESTE".

L'utilisation de modèles de simulation hydrologique, ajustés aux chroniques de pluies et de débits observés, pour calculer des séries fictives d'écoulement dites "de longue durée", à l'aide de pluviomètres eux-mêmes de "longue durée" et de bonne qualité, constitue un préalable indispensable pour s'affranchir et corriger les conditions climatiques spécifiques aux trop courtes périodes d'observation des bassins représentatifs.

Ceci est basé sur le postulat qui affirme que la meilleure estimation des paramètres d'une loi de distribution statistique est obtenue quand la taille de l'échantillon est la plus grande possible¹. Les résultats que nous présenterons correspondent, en fait, à une tentative d'estimation des régimes hydrologiques des soixante ou des quatre-vingt dernières années. Pour que l'amélioration de l'estimation réalisée à l'aide d'une série pluviométrique dite de "longue durée" soit significative, il faut que le gain de précision apporté par l'augmentation de la taille de l'échantillon soit supérieure aux biais induits par le modèle. Ceci montre la nécessité de réaliser la meilleure modélisation possible, étape incontournable de notre démarche.

Le modèle utilisé, appelé SUDENE-ORSTOM est dérivé d'un modèle décrit par PUNGS et CADIER (1985) et par DOHERTY *et al* (1991). Ce modèle avait été créé en 1980 pour répondre aux nécessités spécifiques de la modélisation des petits cours d'eau intermittents du Nordeste. DOHERTY *et al* ont décrit et justifié de manière détaillée les algorithmes et les techniques de calage utilisés, les mesures prises en cas de lacunes des données, le nombre et la qualité des ajustements et les validations réalisées. Résumons-en les points les plus importants.

1 Nous n'aborderons pas le thème des cycles ou des changements climatiques de grande période.

4.2.1. Algorithmes utilisés par le modèle SUDENE-ORSTOM.

Le modèle SUDENE-ORSTOM est un modèle statistique global, fonctionnant au pas de temps journalier. La fonction de production est inspirée de celle décrite par GIRARD (1979) pour son modèle simplifié. Elle permet de calculer une lame écoulée Le en fonction de la précipitation journalière P et d'un indice des précipitations antérieures IK .

a) Calcul de l'indice de précipitations antérieures IK :

Il s'agit d'un indice du type KOHLER (1951), calculé au pas de temps journalier, par la formule :

$$IK_{\text{jour } i} = (IK_{\text{jour } i-1} + P_{\text{jour } i-1}) * CI$$

CI s'appelle l'indice de réduction journalière de IK .

b) Calcul du ruissellement : les hyperboles.

Trois hyperboles tangentes à l'axe des abscisses sont tracées dans le plan (P , Le), comme le montre le schéma de la figure 4.2.1. Chacune de ces hyperboles correspond, par définition, à une valeur constante de IK . Ce graphique montre comment calculer la lame écoulée (Le) correspondant à P et à IK .

- Utilisation des hyperboles :

Le calcul du ruissellement, pour un IK donné, s'effectue par interpolation linéaire sur IK , entre les ordonnées des deux hyperboles dont les valeurs de IK encadrent le IK proposé.

Si la valeur de IK proposé est supérieure à celle de l'hyperbole la plus élevée, on la compare à une borne supérieure des IK et on la ramène à cette valeur si elle le dépasse. Le calcul du ruissellement s'effectue ensuite par extrapolation linéaire sur IK , par rapport aux ordonnées des deux hyperboles supérieures. On procède de manière symétrique quand la valeur de IK proposée est inférieure à celle de l'hyperbole la plus basse.

- Intérêt des hyperboles :

Le principal intérêt de ces hyperboles est leur allure très proche dans le plan (P , Le) des isolignes $IK = \text{constante}$, tracées empiriquement en reportant dans ce plan les valeurs de P , Le et IK de chacune des crues observées, comme le montrent, par exemple, les courbes des figures 3.3.6. ou 3.4.4., tracées pour les bassins du RIACHO DO NAVIO et de JUATAMA. Elles peuvent donc être directement ajustées sur l'ensemble des triplets P , Le , IK correspondant à chaque crue sans qu'il soit nécessaire d'effectuer la moindre hypothèse sur les équations de fonctionnement hydrologique du bassin.

L'hyperbole est, par ailleurs, une fonction analytique économique en nombre de paramètres, qui remplit les deux conditions suivantes :

- être tangente à l'axe des abscisses
- présenter une direction asymptotique.

C'est une des raisons de leur choix.

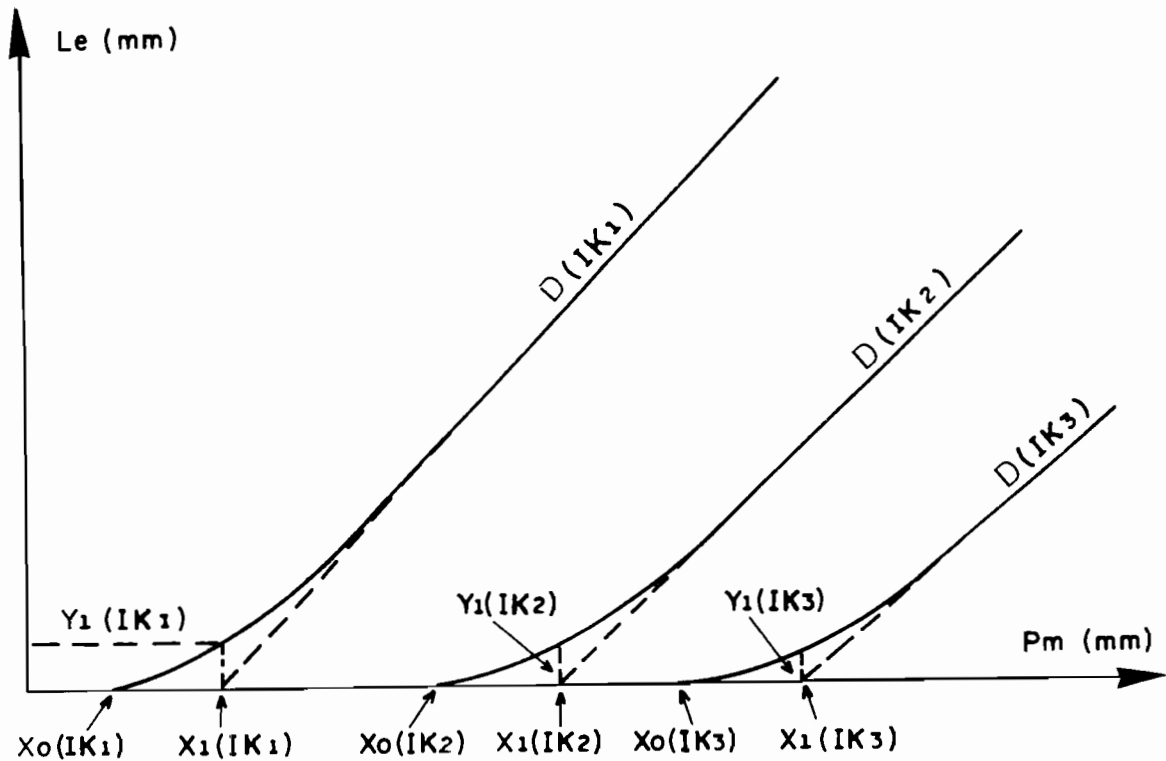


Figure 4.2.1. Paramétrisation des hyperboles.

- Paramétrisation des hyperboles :

Nous avons cherché, tout d'abord, à définir les hyperboles de la façon la plus simple possible, du point de vue de l'utilisateur.

Chaque hyperbole est définie par les quatre valeurs suivantes, qui ont une représentation graphique évidente :

X_0 Point de tangence de l'hyperbole avec l'axe des abscisses. Il correspond à ce qu'on appelle la "précipitation limite d'écoulement" correspondant à la valeur IK de l'hyperbole.

D Pente de l'asymptote de l'hyperbole. Elle correspond à ce que l'on pourrait appeler un "coefficient marginal d'écoulement à saturation", c'est à dire la proportion d'eau supplémentaire qui s'écoulera pour chaque quantité de pluie supplémentaire, quand on peut estimer que l'hyperbole est confondue avec son asymptote.

X_1 Abscisse de l'intersection de l'asymptote avec l'axe des abscisses.

Y_1 Ordonnée de l'hyperbole correspondant à l'abscisse X_1 .

Calcul de la Lame ruisselée LE à partir de la pluie journalière PM par une hyperbole tangente à l'axe des abscisses (Adapté de J.M. HERBAUD ; inédit 1983).

Ce calcul est défini à l'aide des instructions FORTRAN suivantes :

Calculer le discriminant $DISCRIM=2.*Y1-D*(X1-X0)$

1er cas : Le discriminant n'est pas nul

$DCLI=Y1**2/(X1-X0)/DISCRIM$	<i>DCLI ne doit pas être nul</i>
$SDCLI=DCLI/ABS(DCLI)$	<i>SDCLI est le signe de DCLI</i>
$DCLMI=(D+DCLI)/2$	<i>DCLMI ne doit pas être nul</i>
$DDCLI=D-DCLI$	<i>DDCLI ne doit pas être nul</i>
$C=DCLMI*X0-X0*DDCLI**2/4./DCLMI-D*X1$	
$Q=DDCLI*DCLMI*C/D$	
$N=-D*X1-Q/DDCLI$	
$R=(DCLMI*X0-D*X1-DCLMI*C/D)**2-(DDCLI*X0)**2/4.-Q*X0$	

$$LE = DCLMI*PM+N-SDCLI*SQRT((DDCLI*PM)**2/4.+Q*PM+R)$$

2ème cas : Le discriminant est nul. La 2ème asymptote est alors verticale.

$N=X1-2.*X0$
 $Q=-2.*D*X0$
 $R=D*X0**2$

$$LE = (D*PM*PM+Q*PM+R)/(PM+N)$$

c) Nombre de paramètres du modèle :

Le nombre de paramètres du modèle SUDENE-ORSTOM est très élevé :

- . Chaque hyperbole est définie par sa valeur de IK et les 4 paramètres X_0 , X_1 , Y_1 et D.
- . Il faut en plus définir la valeur du coefficient CI de réduction journalière de IK et les bornes supérieures et inférieures de ce même indice.

Soit un total de 18 paramètres. Ceci semble absolument prohibitif, surtout quand on sait que la tendance actuelle en modélisation est de diminuer au maximum le nombre de paramètres.

Mais, dans la pratique, pour le calage de ce modèle, on n'utilise jamais tous les degrés de liberté théoriquement disponibles. On évite, si possible, de modifier l'allure des hyperboles dont le tracé a été effectué directement à partir des crues. On se limite à certaines petites améliorations de tracé initial. Ces retouches affectent surtout les valeurs du X_0 et X_1 qui ne peuvent être évaluées avec précision à partir de l'échantillon des crues.

Ainsi, mis à part ces quelques retouches, et quand on ne détecte pas d'anomalies, les calages s'effectuent, en fait, sur 3 à 5 paramètres (les trois valeurs IK1, IK2 et IK3 et éventuellement leurs bornes supérieures et inférieures IKX et IKN). Ceci correspond au nombre de degrés de liberté des modèles usuels.

d) Ecoulement de base :

Pour représenter l'écoulement de base que l'on observe sur certains grands bassins, deux "pseudo-réservoirs" ont été ajustés au modèle. Ils peuvent représenter la vidange simultanée de deux aquifères : l'aquifère à vidange rapide et l'aquifère à vidange lente. Ces "pseudo-réservoirs" sont alimentés par les écoulements des crues et non par les pluies comme cela se fait habituellement. Ceci a été fait dans le but d'empêcher tout risque de génération intempestive d'écoulement de base par le modèle en l'absence de crue préalable. Cette partie du modèle utilise, quand elle existe, 3 ou 6 paramètres supplémentaires.

4.2.2. Présentation d'un exemple d'ajustement.

Pour des raisons historiques, d'accessibilité aux données, et de rapidité d'exécution, l'environnement informatique utilisé pour les ajustements est le "gros" système IBM CMS/VS de la SUDENE, qui gère également la Banque de Données Hydrométéorologiques du Nordeste brésilien. Les micro-ordinateurs sont réservés à la mise en forme des résultats et aux graphiques finaux.

Le diagramme de la figure 4.2.2. indique les principales étapes d'un ajustement.

Nous avons choisi comme exemple le bassin du Riacho do CALDEIRAO, bassin de $0,77 \text{ km}^2$ de surface, qui appartient au bassin expérimental de Taua et qui possède 8 années de données de bonne qualité. L'étalonnage de cette station hydrométrique est stable, ce qui est primordial.

4.2.2.1 Initialisation et démarrage.

La première étape de l'ajustement consiste à créer, à partir de la banque de données, un fichier spécial appelé "FLUPLU", qui contiendra les pluies et les débits journaliers de la période et du bassin à ajuster. Il faut aussi déterminer, comme le montre l'exemple du tableau 4.2.1, les valeurs initiales des paramètres des hyperboles à partir des courbes de la figure 4.2.3. qui représente la relation entre la pluie P_m , la lame écoulée L_e et l'indice de saturation préalable IK , pour les principales crues du bassin.

Tableau 4.2.1 Valeurs initiales des paramètres des hyperboles de la station de Caldeirão.

IH	X0	X1	Y1	D
150	2,5	4,0	1,0	0,54
90	5,5	15,5	2,0	0,50
30	17,0	27,6	2,2	0,37

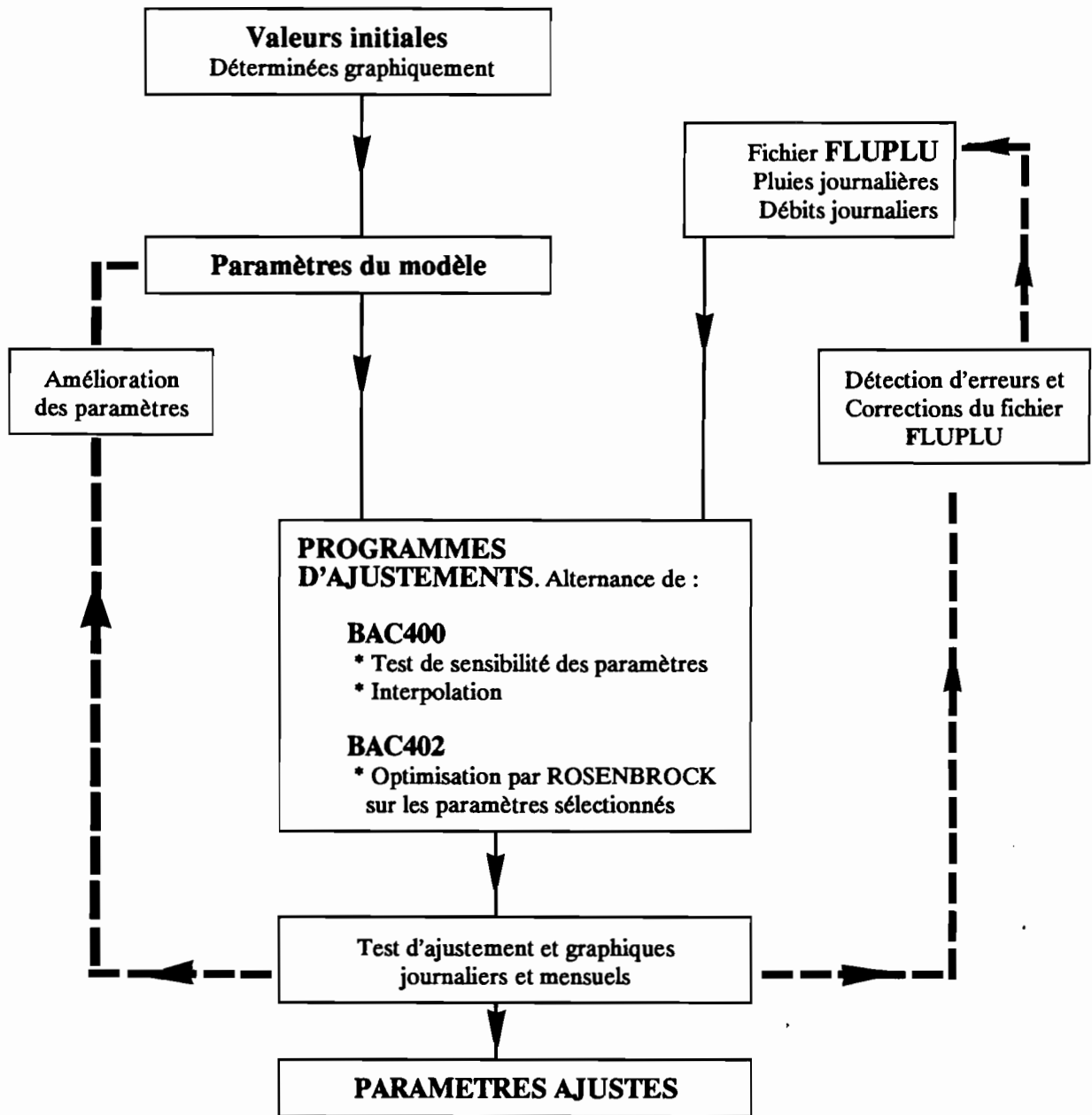


Figure 4.2.2. Principales étapes de l'ajustement.

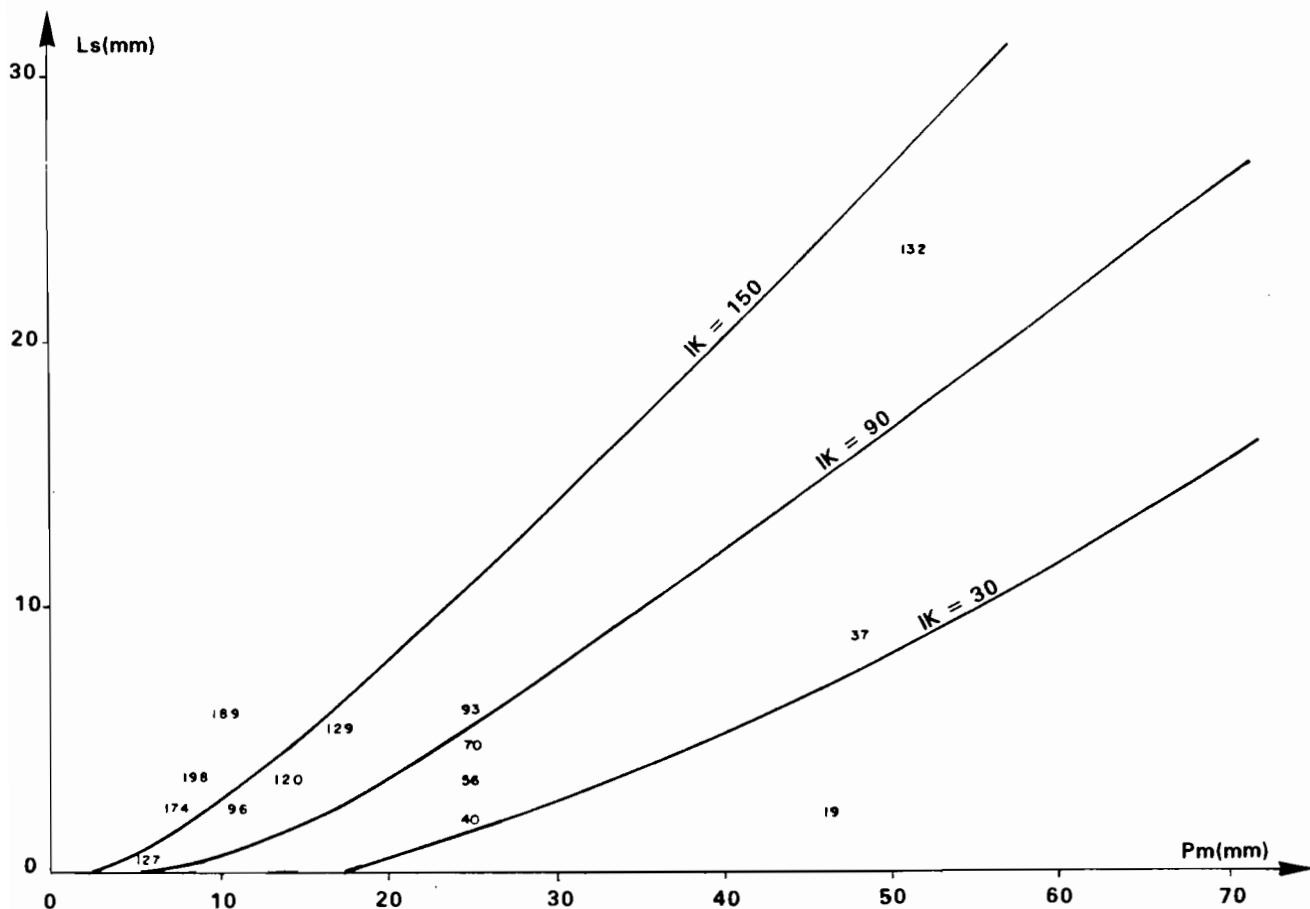


Figure 4.2.3 Relation entre la pluie (P_m), l'écoulement (L_s) et l'indice de saturation antérieure (IK)

4.2.2.2 Les programmes de calage.

Le calage ou l'ajustement d'un modèle cherche à rendre les débits calculés les plus proches possibles des débits observés. Pour cela, on exécutera autant de fois que nécessaire l'un ou l'autre des deux programmes d'ajustement BAC400 et BAC402.

Ces deux programmes ont des fonctions spécifiques différentes et complémentaires :

- Le programme BAC400 permet d'effectuer ce que nous appelons un "test de sensibilité" par rapport à chacun des paramètres du modèle. Ce test permet de quantifier l'influence d'une petite variation de chaque paramètre sur les débits calculés par le modèle et sur les valeurs des différents critères d'ajustement retenus. En se situant dans l'espace composé par tous les paramètres du modèle, le BAC400 calcule, en utilisant un algorithme basé sur le principe de la plus grande pente, la direction "optimale" pour améliorer le critère choisi.

Ce programme permet également d'effectuer une ou plusieurs interpolations linéaires entre deux jeux de paramètres.

- Le programme BAC402 est une adaptation, réalisée par M. MONTGAILLARD qui utilise l'algorithme de ROSENBROCK (1960), pour effectuer un ajustement automatique d'un certain nombre de paramètres du modèle.

Les deux programmes BAC400 et BAC402 fournissent plusieurs sorties qui permettent de mieux évaluer la qualité de l'ajustement :

- Comparaison des débits observés et calculés effectuée au niveau journalier et mensuel ; en échelle arithmétique et logarithmique.
- Tracé des hyperboles.
- Tableau résumant les valeurs des critères d'ajustement.

Comparaison des algorithmes de calage des programmes BAC400 et BAC402

Le programme BAC400 indique dans quelle proportion il faut faire varier chaque paramètre, sans indiquer la "distance" à parcourir. Cette méthode originale, développée à Recife, est théoriquement plus économique en nombre d'itérations et en temps de calcul qu'une méthode comme celle de ROSENBROCK (1960) qui effectue des optimisations successives et indépendantes pour chacun des paramètres. Cependant le maniement du programme "BAC400" est délicat. Délicat parce que, dans l'espace des N paramètres, la courbure de la surface optimale varie de manière différente pour chaque paramètre, et si la direction optimale, définie en un point donné, peut être suivie pendant longtemps pour certains paramètres, ce n'est pas le cas pour tous. Pour certains paramètres, on sort même parfois très rapidement de leur domaine de validité. Par ailleurs, le programme "BAC400" s'avère incapable de s'extraire d'un extremum secondaire, comme peut parfois le faire la méthode de ROSENBROCK utilisée dans le programme BAC402. En effet, quand ROSENBROCK constate, pour un paramètre donné, un certain nombre d'échecs consécutifs, il effectue une tentative à une distance beaucoup plus grande, qui lui permet parfois de découvrir un autre extremum. Notons cependant que les occurrences de blocage sur des extremums secondaires sont assez faibles puisque l'optimisation commence, en principe, dans une zone relativement proche de l'optimum.

Dans la pratique, on alterne les programmes BAC400 et BAC402, le premier permet une meilleure évaluation de la situation globale, pour définir une stratégie d'ajustement, c'est à dire identifier les paramètres que l'on essaiera de modifier, tandis que le second permet une optimisation numérique rapide sur les paramètres sélectionnés. Au début des ajustements, on est souvent amené à vérifier et à corriger les périodes de pluie ou de débit incohérentes avec l'ensemble des données. **La modélisation s'avère être ainsi, une méthode très efficace de critique de l'information hydropluviométrique.** Un ajustement fin sera toujours effectué, pour conclure, avec le programme BAC400. On s'assurera, en particulier, que la somme des lames calculées soit voisine de la somme des lames observées.

4.2.2.3 Présentation d'un exemple de modèle ajusté.

Dans l'exemple d'ajustement que nous présentons sur le tableau 4.2.2., concernant toujours le bassin de Caldeirão à TAUA, nous rencontrons successivement :

a) Les paramètres du modèle :

Les paramètres du modèle définissent les trois hyperboles. Ce modèle ne comporte pas d'écoulement de base. Notons que le coefficient de réduction journalier, CI, est de 0,938, valeur un peu différente du coefficient de 0,95 que nous avons adopté généralement, comme nous l'indiquons au paragraphe 4.2.3.3. On constate que les valeurs finales des paramètres des hyperboles résultantes de l'optimisation, sont proches des valeurs initiales déterminées graphiquement sur la figure 4.2.3. et reportées sur le tableau 4.2.1.

b) Les termes du bilan :

Les termes du bilan hydrologique mensuel et les figures 4.2.4. et 4.2.5. permettent de se rendre compte, mois par mois et année par année, de la cohérence des ajustements. Pour des raisons d'encombrement, nous avons éliminé de la figure 4.2.5., les périodes sans écoulement de durée supérieure à un jour. Cette "compression" du graphique complique malheureusement un peu la lisibilité du graphique puisque, par exemple, la dernière crue d'une année ne sera séparée que par une seule division de la première crue survenant l'année suivante.

c) Les résultats finaux et les critères d'ajustement :

Un premier tableau résume, année par année, les résultats des ajustements. Il permet de se rendre compte du pourcentage des débits qui ont dû être reconstitués pour cause de lacune (c'est la différence entre les colonnes "observé" et "complété"). On peut aussi estimer la part relative de l'écoulement de base. Les différences entre débits calculés et observés sont calculées aux niveaux journalier et mensuel. On détermine, ensuite, les sommes de ces différences², de leurs carrés et de leurs valeurs absolues, sommes qu'il faut bien entendu minimiser.

Deux critères d'optimisation appelés GENERAL et CRUE, ainsi que les cinq critères mentionnés par SERVAT et DEZETER (1990), sont ensuite reportés. Nous en parlerons au paragraphe suivant.

2 Appelée valeur relative

Calcul des critères "par événement"

Pour pallier à certains décalages pouvant atteindre 24 h, entre les chroniques de pluie et de débits, décalages dus à des modes de traitement différents de l'information pluviométrique et hydrométrique, nous avons calculé une variante des critères d'ajustements journaliers appelée "par événement". La première étape du calcul des critères "par événement" consiste à identifier ce que nous avons appelé un événement, c'est à dire un ensemble de jours consécutifs d'écoulement au cours desquels les lames écoulées journalières sont supérieures à 5 % de la lame la plus forte de l'événement. Pour chaque événement identifié on décale, si nécessaire, de 24 h vers le futur ou vers le passé la série des débits calculés pour minimiser le critère d'ajustement. Le schéma de la figure 4.2.4 illustre les deux types de correction ou de décalage possible.

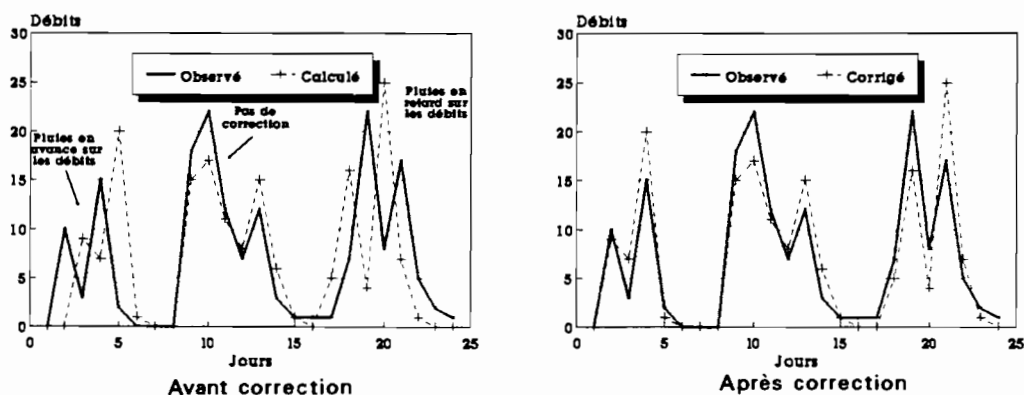


Figure 4.2.4. Correction automatique par événement

d) Les tests de sensibilité :

Le dernier tableau présenté dans cet exemple fournit ce que nous avons appelé la **sensibilité de l'ajustement aux variations de chaque paramètre**. C'est une sorte de "tableau de bord" qui réunit tous les éléments nécessaires pour améliorer manuellement l'ajustement (par opposition à la méthode de ROSENBROCK qui est automatique).

On y trouve successivement :

- Première colonne : le paramètre testé **PAR(I)**
- Deuxième et troisième colonnes : deux rapports appelés **R2** et **R4**, qui sont établis à partir du calcul des conséquences d'une petite variation du paramètre sur le **critère d'ajustement journalier** et sur le total des lames calculées :

$$R2(I) = \frac{\text{Variation du critère calculé avec les carrés}}{\text{Variation de la lame calculée}}$$

Le calcul fait ensuite intervenir un rapport R3, non publié dans l'exemple présenté, défini par :

$$R3(I) = \frac{\text{Variations du critère calculé avec les valeurs absolues}}{\text{Variation de la lame calculée}}$$

R4(I) prend la valeur de R2(I) quand R2(I) et R3(I) sont de même signe et 0 dans le cas contraire.

Deux autres coefficients, **R2** et **R4**, sont calculés de manière analogue avec les critères calculés au niveau mensuel.

- sixième colonne : **Incr1mm**. C'est l'incrément qu'il faudra ajouter au paramètre PAR(I) pour augmenter de 1 mm les lames calculées totales.
- Une dernière colonne, non présentée dans cet exemple, indique la direction dans l'espace des paramètres qui améliore le plus rapidement possible l'ajustement. Cette colonne a été supprimée, puisque nous présentons un modèle ajusté, pour lequel nous ne pouvons justement plus mettre en évidence de possibilité d'amélioration. Les directions proposées par le programme seraient, dans ce cas, erratiques et sans grande signification.

Utilisation du tableau des tests de sensibilité des paramètres :

Ce tableau a été conçu pour faciliter les modifications des paramètres du modèle et d'améliorer rapidement l'ajustement, sans modifier sensiblement la lame calculée. Ceci suppose implicitement que le premier critère d'ajustement est l'égalité des sommes des lames calculées et observées.

Ainsi, si l'on veut modifier simultanément N paramètres³, dont la moyenne des coefficients R4 est MR4, il faudra modifier chacun d'eux proportionnellement à la quantité : $\text{Incr1mm}(I) * (R4(I) - MR4)$. Les valeurs de $\text{Incr1mm}(I)$ et $R4(I)$ sont issus du tableau des tests de sensibilité ; I est le rang du paramètre.

Cette direction donne un poids prépondérant aux paramètres les plus sensibles (R4 fort), tout en maintenant la lame calculée quasi-constante. Une direction est ensuite explorée jusqu'à ce que l'on y trouve un extremum ou que l'on ait dépassé les bornes raisonnables pour l'un des paramètres, en provoquant, par exemple, le croisement de deux hyperboles ou encore des précipitations limites d'écoulement trop faibles, etc.

Exemple numérique :

L'exemple numérique suivant aidera à mieux appréhender l'enchaînement des calculs effectués par le programme BAC400. Supposons que l'on cherche à optimiser l'ajustement présenté en fonction des indices IK(1), X₀(2) et D(3), sur la base du critère par événement, il faudra modifier ces trois paramètres proportionnellement au vecteur Δ du tableau suivant.

Paramètre	R4	Incr1mm	Δ = Incr1mm*(R4-MR4)	2*Δ	ESSAI
IK(1)	130,05	4,06	-0,10	-0,05	129,95
X ₀ (2)	6,11	4,93	-0,24	-0,32	5,47
D(3)	0,31	<u>1,77</u>	0,01	-0,002	0,274
		MR4 = 3,59			

Nous avons calculé la modification apportée en multipliant, dans cet exemple, ce vecteur Δ par un scalaire de 2. On remarque que les variations proposées pour les paramètres X₀(2) et D(3) sont beaucoup plus importantes, en valeur relative, que pour IK(1). Ces deux paramètres sortiront beaucoup plus vite de leur plage de validité. La correction proposée ne semble pas pouvoir apporter des modifications très convaincantes à l'ajustement. Ceci est normal, car nous avons pris comme exemple un modèle déjà ajusté.

3 Ces paramètres sont ceux dont les coefficients R4 sont élevés et pour lesquels l'analyse des figures 4.2.3 à 4.2.5 ne laisse prévoir aucune "contre-indication".

Tableau 4.2.2. BASSIN DE CALDEIRAO à TAUÁ
Exemple de résumé de l'ajustement du modèle SUDENE-ORSTOM

Numéro : 3719 - 1 Période : 1981 à 1988 Surface : 0.769 Km²

PARAMETRES DU MODELE

Indice de réduction journalière de IK : CI = 0.938 IKX = 149.8 IKN = 8.0

	IK	X0	X1	Y1	D
Hyperbole 1	130.05	2.81	6.66	0.93	0.49
Hyperbole 2	92.00	6.11	13.59	1.10	0.33
Hyperbole 3	30.00	19.00	32.00	2.43	0.31

TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE MENSUEL (en mm)

ANNEE		JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	TOTAL
1981	PLUIE	41.3	46.8	447.8	71.3	12.4	1.4	0.0	2.8	1.0	0.0	0.0	44.6	669.4
	ECOULEMENTS : OBSERVES	0.0	0.0	145.9	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9*	173.3
	CALCULES	0.7	0.5	153.5	33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	191.4
	DIFFERENCES	0.7	0.5	7.5	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1
1982	PLUIE	23.1	28.5	109.9	40.9	21.5	15.4	11.0	2.9	1.4	4.7	1.7	0.0	261.0
	ECOULEMENTS : OBSERVES	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
	CALCULES	0.0	0.0	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.7
	DIFFERENCES	0.0	0.0	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.3
1983	PLUIE	3.3	52.9	70.6	21.0	36.9	0.0	6.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	193.1
	ECOULEMENTS : OBSERVES	0.7	0.0	4.4*	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4
	CALCULES	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
	DIFFERENCES	-0.7	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0
1984	PLUIE	3.8	35.1	169.9	154.0	36.0	5.6	31.3	3.5	5.2	0.2	2.3	33.0	479.9
	ECOULEMENTS : OBSERVES	0.0	0.0	17.5*	5.7*	0.0	0.0	0.0*	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6*	24.8
	CALCULES	0.0	0.0	18.5	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	25.8
	DIFFERENCES	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
1985	PLUIE	121.0	166.8	251.3	318.9	90.8	61.2	48.6	9.5	9.1	0.2	4.6	114.9	1196.8
	ECOULEMENTS : OBSERVES	6.2*	20.1	41.2	145.8*	19.3*	15.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--	--
	CALCULES	5.8	17.6	49.1	143.1	21.3	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	253.1
	DIFFERENCES	-0.4	-2.5	7.8	-2.7	2.0	-7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0
1986	PLUIE	13.4	79.2	365.0	122.9	39.2	16.0	9.0	15.6	1.8	0.2	4.4	3.8	670.6
	ECOULEMENTS : OBSERVES	--	--	--	--	--	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--
	CALCULES	0.0	6.2	99.6	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	118.6
	DIFFERENCES	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1987	PLUIE	5.9	19.2	211.7	52.2	19.3	54.1	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	374.6
	ECOULEMENTS : OBSERVES	0.0	--	--	--	--	0.0*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--
	CALCULES	0.0	0.0	15.7	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9
	DIFFERENCES	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	PLUIE	7.9	87.5	248.6	164.5	79.5	14.8	23.6	0.0	0.0	4.4	0.0	71.7	702.6
	ECOULEMENTS : OBSERVES	0.0	3.0	55.4	14.4	17.7*	--	--	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6*	--
	CALCULES	0.0	6.3	44.8	14.5	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	79.3
	DIFFERENCES	0.0	3.3	-10.6	0.1	-6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-13.8

-- Mois manquant totalement

* Mois incomplet (total partiel)

Suite de l'exemple de résumé d'ajustement du modèle SUDENE-ORSTOM

RESULTATS FINAUX ET CRITERES D'AJUSTEMENT DU MODELE :**RESUME DES VALEURS ANNEE PAR ANNEE**

Année	LAMES ANNUELLES (MM)						D I F F E R E N C E S					
	Observé	Complété	Calculé	Ruissellement	Base1	Base2	CRITERES D'AJUSTEMENT			D'AJUSTEMENT		
							Mensuel		Journalier		Relatif	Carré
81	170.4	173.3	191.4	191.4	0.0	0.0	18.1	145.6	18.1	4809.0	187.3	
82	10.0	10.0	8.7	8.7	0.0	0.0	-1.3	1.8	1.3	60.8	14.3	
83	1.0	5.4	4.5	4.5	0.0	0.0	-1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	
84	8.9	24.8	25.8	25.8	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	6.6	3.6	
85	223.0	256.1	253.1	253.1	0.0	0.0	-3.0	131.6	22.7	2305.5	220.4	
86	0.0	118.6	118.6	118.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
87	0.0	20.9	20.9	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
88	90.1	93.2	79.3	79.3	0.0	0.0	-13.8	167.3	20.6	311.6	66.2	
TOTAL	503.5	702.3	702.2	702.2	0.0	0.0	-0.1	447.9	64.7	7494.0	492.7	
										Critère par événement	3484.0	413.1

CRITERES D'AJUSTEMENT

GENERAL	POINTE	NASH	CREC	CRECBI	FORTIN	SEXPER
22.6%	8.9%	0.985	0.718	0.794	1.129	5.441

TEST DE SENSIBILITE DE L'AJUSTEMENT AUX MODIFICATIONS DES PARAMETRES

Paramètre testé	Critère par événement		Critère mensuel		Incr1mm	
	R2	R4	R2	R4		
CI	0.94	6.05	6.05	0.33	0.33	0.00015
IHX	149.82	2.50	2.50	3.86	0.00	0.20
IHN	8.03	5.16	5.16	0.80	0.80	18.44
IK(1)	130.05	4.06	4.06	2.84	0.00	-0.10
X0(1)	2.82	4.82	4.82	1.29	0.00	0.08
X1(1)	6.66	2.55	2.55	1.21	0.00	-0.02
Y1(1)	0.93	2.04	2.04	0.99	0.00	0.01
D(1)	0.49	8.96	8.96	6.35	6.35	0.00138
IK(2)	92.00	-5.92	0.00	7.02	0.00	1.09
X0(2)	6.11	4.93	4.93	1.98	0.00	-0.24
X1(2)	13.59	2.58	2.58	4.45	0.00	0.15
Y1(2)	1.10	37.48	0.00	29.32	0.00	-0.35
D(3)	0.33	9.95	0.00	-15.55	0.00	0.02
IK(3)	30.00	3.20	3.20	-0.44	0.00	-1.22
X0(3)	19.00	-0.07	0.00	4.06	4.06	-8.30
X1(3)	32.00	3.47	3.47	-0.59	-0.59	-0.27
Y1(3)	2.43	3.53	3.53	-0.60	-0.60	0.07
D(3)	0.31	1.77	1.77	-0.25	-0.25	0.01

R2 et R4 : Sensibilité du critère d'ajustement à une petite variation du paramètre.

Incr1mm : Accroissement du paramètre qui augmente de 1mm la somme des débits calculés.

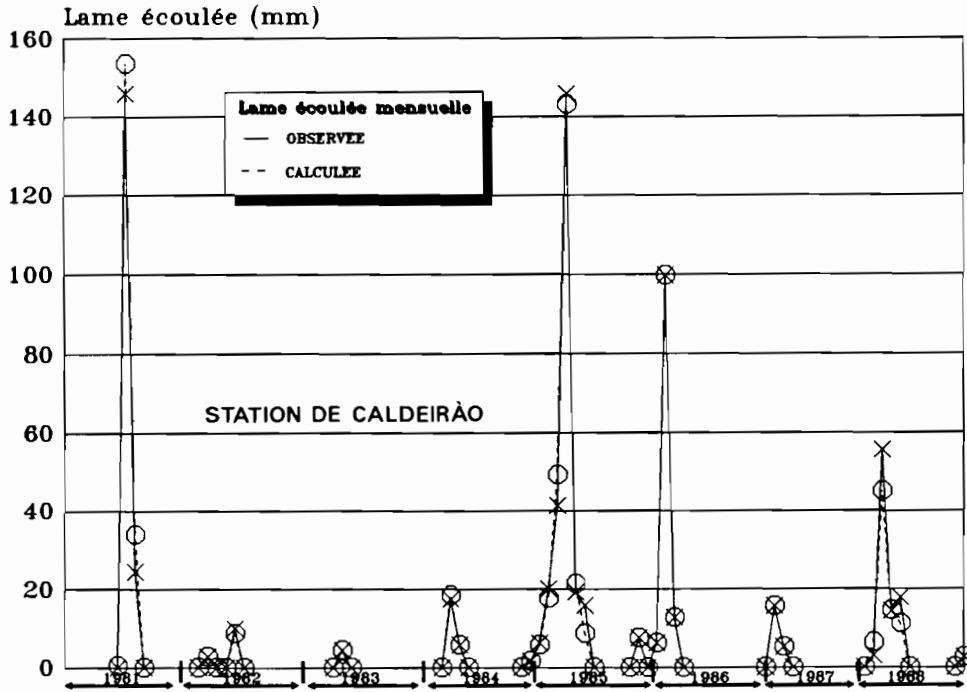


Figure 4.2.5 Comparaison des valeurs mensuelles des écoulements calculés et observés.

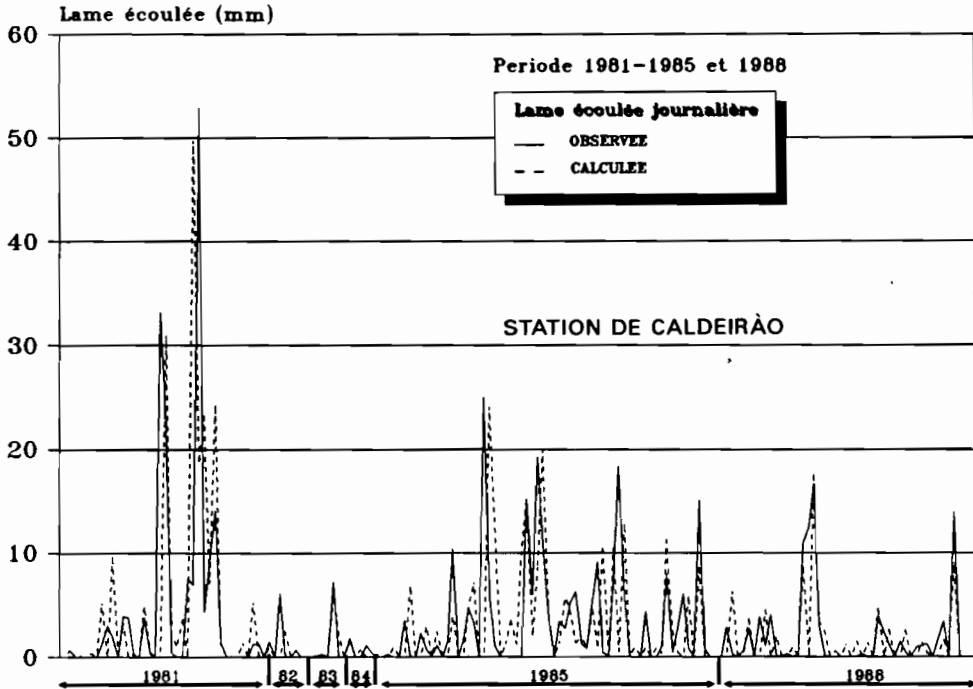


Figure 4.2.6 Comparaison des valeurs journalières des écoulements calculés et observés.

4.2.3. Ajustements réalisés : Validation.

Des ajustements analogues à l'exemple présenté ont été réalisés pour 42 bassins différents avec un total de 243 stations années, soit une moyenne de 5,8 années par bassin.

4.2.3.1 Critères d'ajustement.

Définitions

Le tableau 4.2.3. résume les critères d'ajustement calculés avec toutes les données disponibles de chacun des bassins, avec les formules suivantes, Q_{obs} symbolisant les lames mensuelles observées et DIF les différences entre les lames mensuelles calculées et observées. Nous avons utilisé, pour nos calages deux critères baptisés "GENERAL" et "POINTE", critères calculés selon les formules suivantes:

$$GENERAL = \sqrt{\frac{\sum \frac{DIF^2}{Q_{obs}}}{\sum Q_{obs}}} \times 100$$

Le critère "GENERAL" correspond essentiellement à une somme d'écart relatifs. Ce critère a une plage de sensibilité étendue, qui s'étend des forts aux faibles débits. C'est celui qui a été généralement utilisé pour évaluer la qualité des ajustements.

$$POINTE = \sqrt{\frac{\sum DIF^2}{\sum Q_{obs}^2}} \times 100$$

Ce critère "POINTE" a une formulation très voisine de celle de NASH, la différence étant que la pondération se fait par un terme de somme, équivalent à une moyenne observée, alors que NASH la fait par une somme des écarts à la moyenne. Son domaine de prédilection est donc les crues et les forts débits. Ce critère ne présentera qu'une faible fiabilité pour les étiages.

Nous avons également calculé les critères de NASH, CREC, CRECBI, FORTIN et SEXPER, pour tous les ajustements, en utilisant les formules suivantes, reprises de SERVAT *et al* (1991)

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_c - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_{mo})^2}$$

$$CREC = \frac{1}{N} \sum \left[\left| 1 - \frac{Q_c}{Q_o} \right| * \left| 1 - \frac{Q_o}{Q_{mo}} \right| \right]$$

$$CRECBI = \frac{1}{N} \sum \left[\left| 1 - \frac{Q_c}{Q_o} \right| * \left| 1 - \frac{Q_o}{Q_{mo}} \right| \right] + \frac{1}{N} \sum \frac{Q_o - Q_c}{Q_{mo}}$$

$$FORTIN = \frac{1}{N} * \sum \left| \left(\frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right) * \left(1 + \frac{|Q_o - Q_{mo}|}{Q_{mo}} \right) \right|$$

$$SEXPER = \frac{1}{N} \cdot \sum \left[EXP \frac{|Q_c - Q_o|}{Q_o} * \frac{Q_o}{Q_{mo}} \right]$$

Avec: N - nombre d'observations
 Qc - débit calculé
 Qo - débit observé
 Qmo - débit moyen observé

Tableau 4.2.3 Critères d'ajustement des modèles

BASSIN	GENERAL	POINTE	NASH	CREC	CRECBI	FORTIN	SEXPER
PIR	649.0	30.1	0.886	175.531	176.360	350.368	*****
MNO	37.1	8.8	0.985	1.792	2.006	3.063	10.838
MOQ	47.1	21.2	0.928	1.146	1.185	2.026	4.583
JOF	38.0	26.1	0.898	1.070	1.263	1.668	3.911
ACD	48.7	23.2	0.901	1.068	1.106	1.769	5.067
CAL	22.6	8.9	0.985	0.718	0.794	1.129	5.441
LUZ	41.2	16.7	0.928	0.403	0.489	0.822	3.341
CHI	58.1	18.2	0.936	1.428	1.614	2.402	10.516
JUZ	54.2	17.2	0.918	0.929	1.029	1.796	3.628
NAS	155.1	13.3	0.955	11.272	11.283	22.587	*****
MIT	25.8	12.2	0.962	0.591	0.633	0.993	3.545
M2T	38.3	10.0	0.958	0.995	1.026	1.843	4.569
M3T	26.9	7.5	0.931	0.572	0.929	0.780	4.397
M4T	50.0	19.0	0.883	2.692	3.001	4.661	225.732
GA2	49.3	7.3	0.934	0.984	1.326	1.838	2.983
JA2	35.9	7.5	0.980	1.387	1.437	2.748	567.988
UM1	46.1	8.2	0.848	1.781	3.182	2.338	8.744
UM2	57.4	35.5	0.852	2.465	3.671	3.111	10.556
MS1	43.4	16.9	0.950	1.549	1.720	2.578	5.579
MS2	54.8	1.4	0.902	1.904	2.971	3.013	7.318
S31	94.2	26.1	0.853	2.068	2.156	3.766	40.890
S32	15.0	2.1	0.995	0.498	0.550	1.010	2.314
S33	54.7	23.9	0.853	0.512	0.625	1.145	5.326
S41	69.9	30.5	0.711	2.802	2.984	3.978	9.737
S42	33.5	12.4	0.939	1.812	1.935	3.383	8.131
S43	44.1	4.3	0.969	0.937	1.410	1.852	5.503
MAT	97.3	9.9	0.975	2.603	2.617	5.286	*****
OSB	56.5	13.9	0.970	2.940	2.947	5.844	*****
SAL	57.9	17.1	0.923	1.746	1.780	3.431	*****
JU1	32.6	12.2	0.955	1.337	1.355	2.546	12.155
JU2	49.3	16.8	0.935	1.176	1.193	2.399	5.315
LGR	56.4	8.7	0.818	1.293	2.613	1.907	5.849
LBA	164.5	53.9	0.612	2.062	2.740	4.452	*****
FZI	63.5	22.7	0.871	1.338	1.421	2.354	10.798
FZP	153.4	22.2	0.852	9.673	9.746	19.035	*****
MAN	22.0	2.8	0.964	0.719	1.237	1.124	5.360
JER	44.4	17.2	0.921	0.814	1.044	1.343	4.794
PCO	26.8	11.2	0.972	0.379	0.407	0.753	2.901
MOYENNE	71.4	16.2	0.911	6.447	6.731	12.556	-

- On ne dispose pas des critères d'ajustement pour les bassins QUIXABINHA (QUI), JARDIM (JAR), BATATEIRAS (BPC), MISSAO VELHA (MVE).
- Se reporter au tableau 4.2.5 pour la signification des sigles des bassins utilisés

Validité de ces critères

Les critères GENERAL, POINTE et de NASH sont les seuls à pénaliser un modèle qui génère des débits non nuls quand le débit moyen observé est nul. Sur ce point, ces trois critères nous semblent donc mieux adaptés que les autres aux rivières intermittentes.

Le critère SEXPER paraît inadapté aux régimes de ces rivières. Il fournit en effet des résultats surprenants et ne présente que peu de cohérence avec les autres critères.

Analyse des résultats

Le meilleur ajustement, au regard de l'ensemble des critères est le bassin S32 (SUME, micro-bassin 3, 2^e phase). Cinq autres bassins se détachent ensuite du lot : PCO (Pedro Costa), CAL (Caldeirão), MIT (Micro-bassin 1 de TAUA), LUZ (Luzimar) et M3T (Micro-bassin 3 de TAUA)). Le bassin de Caldeirão (CAL) que nous avons présenté fait donc partie des cinq ou six meilleurs ajustements.

Par contre les quatre stations de LBA (Lagedo do Baixo) et FZP (Fazenda Passagem) sur le bassin d'Ibipeba et celle de PIR (Pirangi) et NAS (Açude Nacimentinho) se partagent les plus mauvais critères.

4.2.3.2 Validation des modèles.

Deux essais de validation ont été effectués avec les données de l'année 1989 sur les bassins de Caldeirão et de Moquem, avec des données qui n'ont été dépouillées qu'après le calage des deux modèles correspondants. Les périodes de validation sont malheureusement beaucoup trop courtes, pour présenter une grande signification. Les coefficients trouvés semblent cependant prometteurs, comme le montrent les figures 4.2.7., 4.2.8. et le tableau 4.2.4.

Tableau 4.2.4. Validation des modèles.

BASSIN	GENERAL	POINTE	NASH	CREC	CRECBI	FORTIN	SSEXPER	V A L I D A T I O N	
	Durée totale	Nombre de pluies							
CAL	2,5	0,0	0,999	0,084	0,187	0,103	6,1	30 jours	9 pluies
MOQ	5,3	5,3	0,997	0,585	1,222	0,638	12,7	10 jours	6 pluies

Les excellentes valeurs des critères calculés sur les périodes de validation de ces deux bassins confirment les ajustements antérieurs, mais reflètent aussi la stabilité et la bonne qualité exceptionnelle des données de ces deux stations, pour l'année 1989.

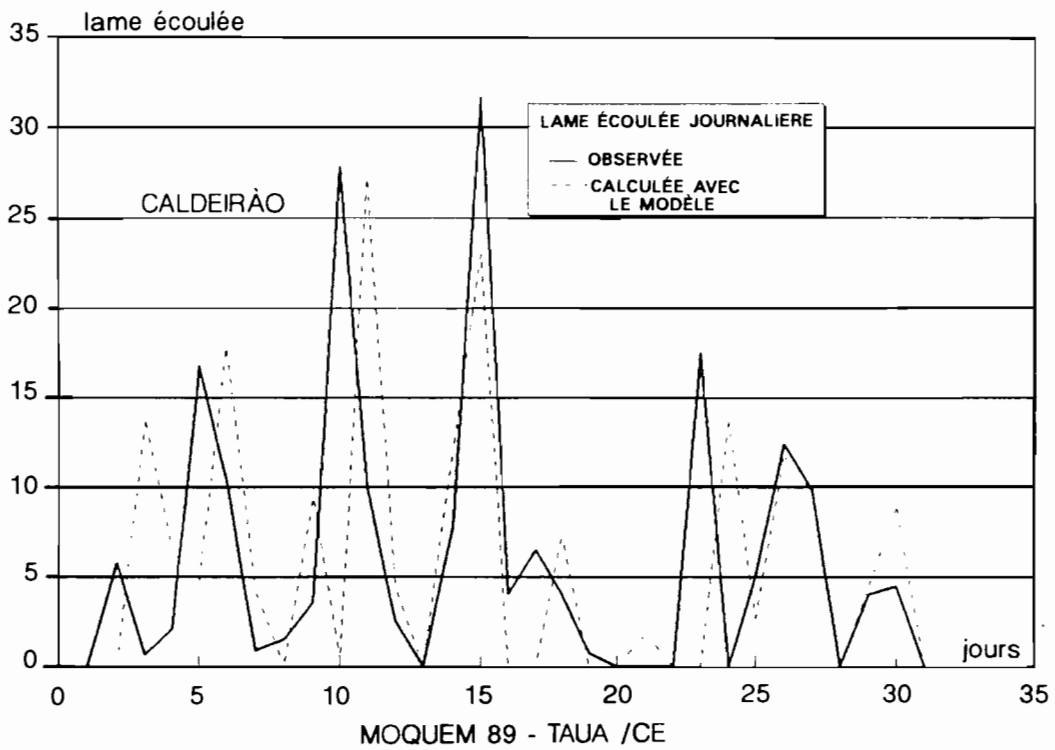


Figure 4.2.7 Validation du modèle pour CALDEIRAO

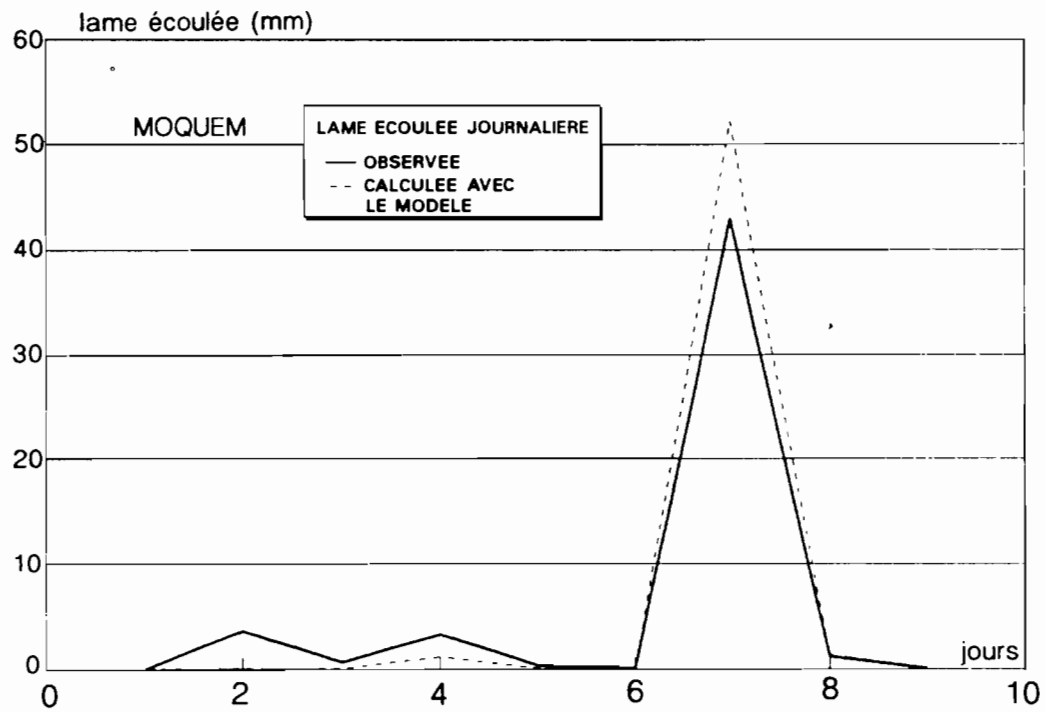


Figure 4.2.8 Validation du modèle pour MOQUEM

4.2.3.3 Paramètres principaux des modèles.

Essayons d'indiquer la signification physique des paramètres principaux des modèles ajustés, qui sont résumés dans le tableau TT 4.2.5.

- **CI** Le coefficient de réduction journalier de IK. Plus ce coefficient sera élevé, plus "la mémoire" du bassin par rapport aux pluies anciennes sera grande. Plusieurs calculs d'optimisation nous ont toujours conduit à des valeurs de CI toujours comprises entre 0,90 et 0,98. Ce paramètre se révélant peu sensible, nous l'avons fixé à 0,95 pour les deux derniers tiers des ajustements. Ceci présente l'avantage de pouvoir comparer directement les valeurs de IK d'ajustements différents. Il est probable que pour de tout petits bassins, sans zone de rétention d'eau, comme les parcelles, les micro-bassins ou l'açude Luzimar, la valeur optimale de CI soit plus basse et diminue peut-être, jusqu'à 0,6 ou 0,7 comme l'a proposé CHEVALLIER (1983)⁴.
- **IKX et IKN** sont les bornes supérieures et inférieures imposées aux IK.
- Pour les hyperboles 1 et 3, nous avons retenu :
 - La valeur de **IK** de l'hyperbole :
 - **X₀** qui correspond à la précipitation limite d'écoulement, sur sol saturé pour la première hyperbole et de début de saison des pluies pour la dernière.
 - **D** qui correspond au "coefficient marginal" d'écoulement des fortes crues.

4 CHEVALLIER propose une formule de réduction de IK qui peut s'écrire :

$$IK(j) = (IK(j-1) + P(j-1))e^{-a}$$

Il propose une valeur de a de 0,5 ce qui correspond à un CI de 0,61. Ces valeurs sont adaptées à des parcelles, beaucoup plus petites, étudiées en Afrique, dans le cadre du programme de simulation de pluie pour lesquelles les intervalles de temps sont inférieurs à 1 heure et non de 1 jour. Ceci explique les valeurs plus élevées que nous avons utilisées pour les petits bassins du Nordeste brésilien.

Tableau 4.2.5 Paramètres principaux des ajustements et sigles des bassins

SIGLE	NOM DU BASSIN	CI	IKX	IKN	IK(1)	X0(1)	D(1)	IK(3)	X0(3)	D(3)
PIR	PIRANGI	0.900	180.0	0.0	160.0	1.00	0.379	12.0	33.0	0.379
MNO	MUNDO NOVO	0.902	190.0	0.0	184.0	2.00	0.496	35.0	30.1	0.496
MOQ	MOQUEM	0.950	143.1	19.4	143.1	2.00	0.697	37.9	41.0	0.293
JOF	JOAO FRAGOSO	0.950	130.0	16.6	128.3	1.91	0.660	35.0	13.0	0.144
ACD	ACUDINHO	0.950	130.0	10.1	118.0	8.23	0.571	23.9	23.0	0.273
CAL	CALDEIRAO	0.938	149.8	8.0	130.0	2.81	0.487	30.0	19.0	0.310
LUZ	LUZIMAR	0.950	110.0	12.7	89.7	2.00	0.713	15.0	10.9	0.362
CHI	CHICO	0.950	150.0	20.5	147.0	2.00	0.410	30.0	25.0	0.235
JUZ	JUAZEIRO	0.953	110.0	17.0	94.0	4.15	0.211	20.4	20.0	0.163
NAS	NASCIMENTINHO	0.950	138.7	25.0	124.0	3.00	0.580	25.4	18.0	0.200
M1T	MICRO-BASSIN 1 TAUÁ	0.950	158.0	30.0	158.0	4.00	0.550	57.1	16.0	0.430
M2T	MICRO-BASSIN 2 TAUÁ	0.950	158.0	20.0	158.0	4.00	0.480	65.0	16.0	0.430
M3T	MICRO-BASSIN 3 TAUÁ	0.950	180.0	8.3	150.1	2.00	0.668	34.6	25.0	0.570
M4T	MICRO-BASSIN 4 TAUÁ	0.950	190.1	29.2	155.0	6.10	0.370	50.0	31.6	0.150
GA2	GANGORRA 90	0.950	305.9	20.0	251.0	2.00	0.340	50.0	23.0	0.210
JA2	JATOBA 90	0.950	250.0	0.0	220.0	2.00	0.177	20.0	15.4	0.177
UM1	UMBURANA 81	0.936	234.0	40.0	212.7	3.00	0.520	42.0	25.0	0.520
UM2	UMBURANA 90	0.940	234.0	40.0	212.7	3.00	0.550	42.0	25.0	0.550
MS1	MICRO-BASSIN 1 SUMÉ	0.950	250.0	11.0	250.0	6.00	0.370	55.1	30.0	0.160
MS2	MICRO-BASSIN 2 SUMÉ	0.950	250.0	30.0	250.0	3.00	0.764	83.0	45.0	0.261
S31	MICRO-BASSIN 31 SUMÉ	0.950	246.3	74.0	236.7	4.70	0.650	92.7	14.0	0.600
S32	MICRO-BASSIN 32 SUMÉ	0.950	131.6	9.9	118.3	2.00	0.650	10.2	25.0	0.600
S33	MICRO-BASSIN 33 SUMÉ	0.950	93.8	1.0	76.3	2.50	0.650	2.5	10.0	0.620
S41	MICRO-BASSIN 41 SUMÉ	0.950	210.6	67.5	176.7	4.70	0.650	93.0	14.0	0.600
S42	MICRO-BASSIN 42 SUMÉ	0.950	121.0	2.3	121.0	2.00	0.650	2.3	25.0	0.600
S43	MICRO-BASSIN 43 SUMÉ	0.950	91.6	1.1	88.2	2.50	0.650	28.9	10.0	0.620
MAT	MATRIZ	0.960	220.0	5.0	203.8	0.35	0.203	17.5	24.9	0.203
OSB	OSCAR BARROS	0.981	383.0	68.0	330.0	2.00	0.327	75.0	27.7	0.327
SAL	SALOBRE	0.979	280.0	40.0	229.8	4.00	0.435	83.8	21.2	0.435
JU1	JUATAMA 64	0.952	300.0	40.0	234.0	2.00	0.372	40.0	18.0	0.372
JU2	JUATAMA 75	0.960	300.0	80.0	260.0	2.30	0.351	95.0	25.0	0.351
LGR	LAGOA GRANDE	0.900	140.0	10.0	140.0	1.50	0.023	10.0	48.5	0.023
LBA	LAJEDO DE BAIXO	0.976	265.0	30.0	180.0	4.12	0.016	60.0	20.0	0.016
FZI	FAZENDA ISABEL	0.903	125.0	0.0	120.0	1.00	0.065	4.0	30.0	0.065
FZP	FAZENDA PASSAGEM	0.910	140.0	5.5	140.0	1.00	0.330	21.0	28.5	0.330
BPC	BATATEIRAS EM PTE. CARITE	0.950	300.0	10.0	250.0	1.00	0.200	50.0	15.0	0.200
MVE	MISSAO VELHA	0.950	300.0	10.0	280.0	5.00	0.060	50.0	17.0	0.060
AJA	ACUDE JARDIM	0.950	250.0	10.0	190.0	2.00	0.200	40.0	15.0	0.200
QUI	QUIXABINHA	0.950	300.0	20.0	290.0	2.00	0.200	65.0	25.0	0.200
MAN	MANOEL	0.950	203.0	25.0	200.0	1.50	0.335	42.0	8.0	0.185
JER	JERICO	0.950	116.1	20.0	110.0	1.50	0.650	30.0	12.0	0.350
PCO	PEDRO COSTA	0.950	188.9	8.0	188.5	2.00	0.210	20.0	10.0	0.200

4.3 CHOIX DES PLUVIOMETRES POUR LA TRANSPOSITION SPATIALE.

Une fois les modèles calés et validés, on doit les utiliser pour engendrer des séries fictives de débits de longue durée. Pour cela on utilise comme donnée d'entrée les séries ou chroniques de pluies journalières d'un ou plusieurs pluviomètres du réseau général de bonne qualité, à la place des pluies moyennes observées sur le bassin qui ont servi au calage.

Il est donc indispensable de sélectionner des pluviomètres dont les données journalières soient d'excellente qualité et de définir les zones géographiques qu'ils sont susceptibles de représenter.

Les étapes de notre approche sont les suivantes :

- Détermination de zones pluviométriques homogènes par rapport aux précipitations en 24 h.
- Sélection et critique des pluviomètres existants
- Regroupements des zones et choix des pluviomètres représentatifs.

4.3.1. Zonage pour les pluies en 24 h.

Le ruissellement, qui constitue la plus grande part des écoulements des zones semi-arides, est provoqué par des pluies brèves mais intenses. Il est donc naturel de chercher à effectuer un zonage pluviométrique des pluies de courte durée. Nous avons pour cela utilisé une méthodologie définie par CADIER *et al.* (1981), pour effectuer un zonage des totaux pluviométriques en 24 h, de période de retour annuelle. Ce zonage a concerné plus de 1336 pluviomètres qui présentaient plus de dix ans d'observations exploitables. On a utilisé pour cela les programmes d'ajustement de lois statistiques tronquées par Y. BRUNET-MORET (1969) et adaptés par G. JACCON (1978).

Les ajustements aux lois de PEARSON III, GOODRICH et GALTON ont été effectués, celui de la loi de GOODRICH donnant les meilleurs résultats. Le zonage fait est en général significatif. Ainsi, les moyennes calculées en 1981 pour les zones 1 et 8, sont respectivement de 61 mm et de 52 mm avec des écarts types de 6 mm, ce qui rend ces zones significativement différentes, puisque les intervalles de confiance à 95 % de la moyenne de chaque zone sont respectivement 61 ± 1 mm et 52 ± 2 mm).

Pour la partie du "Nordeste" dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 1000 mm, on aboutit à dix zones différentes reportées sur la figure 4.3.1., que nous appellerons "zonage pluviométrique initial".

4.3.2. Critique des données pluviométriques.

4.3.2.1 Sélection des pluviomètres.

Nous avons procédé à plusieurs classifications et sélections successives des 2200 pluviomètres répertoriés dans le Nordeste, en nous basant sur des critères de qualité de plus en plus sévères.

*** Première sélection : 1336 pluviomètres analysés au niveau journalier.**

Environ la moitié de ces pluviomètres ont une série supérieure à dix ans sans grave lacune. Ils ont fait l'objet d'un ajustement statistique qui a abouti au "zonage pluviométrique initial" des totaux en 24 h, décrit précédemment. Ce zonage, qui concerne une surface de 800 000 km², n'aurait pas pu être réalisé avec un nombre plus réduit de pluviomètres.

*** Deuxième sélection effectuée au niveau des totaux annuels : 156 pluviomètres dont les séries sont longues et de bonne qualité.**

Nous avons ensuite utilisé une sélection plus rigoureuse effectuée par MOLINIER à l'occasion de l'élaboration d'une carte d'isohyètes homogénéisées (inédit 1988), qui nous a permis de sélectionner 156 pluviomètres, parmi les 1336 de la liste précédente. MOLINIER avait considéré, pour sa sélection, la longueur des chroniques pluviométriques, leur homogénéité et la cohérence des séries de leurs totaux annuels par rapport aux pluviomètres de la région. Cette homogénéisation a été effectuée avec la méthode du vecteur régional (HIEZ, 1978) implantée par G. JACCON (1978) dans la Banque de Données de la SUDENE. Toutes les séries ont une durée supérieure à 35 ans. 80 % de ces pluviomètres ont été observés pendant plus de 45 ans. Ces pluviomètres qui représentent essentiellement les zones sèches⁵, ont été reportés sur la figure 4.3.2. et dans le tableau de l'annexe 3.

4.3.2.2 Attribution d'une classe de qualité aux 156 pluviomètres sélectionnés.

*** Définition des quatre critères de qualité A,B,C,D.**

Les 156 pluviomètres de la liste du tableau de l'annexe 3 ont fait l'objet d'une sélection sévère et sont donc tous supposés être de bonne qualité. Cependant, nous cherchons, rappelons-le, à sélectionner un très petit nombre de pluviomètres de la meilleure qualité possible, dont on connaisse la représentativité géographique pour qu'il puissent servir "d'entrée" à des modèles. Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué un nouveau tri de ces 156 postes, tri basé sur les principes suivants :

a) **Cohérence entre les totaux annuels homogénéisés par MOLINIER et les fichiers de pluies journalières (critère de qualité A).**

Les données de chaque pluviomètre apparaissent dans quatre fichiers différents :

M = Annuaire pluviométrique mensuel publié par la SUDENE en 1990 issu du fichier de pluviométrie mensuelle PLM.

⁵ Nous avons repris tous les pluviomètres sélectionnés par MOLINIER qui avaient un total inférieur à 1000 mm, plus une dizaine de pluviomètres supplémentaires dont les totaux sont compris entre 1000 et 1100 mm, afin de faciliter les extrapolations.

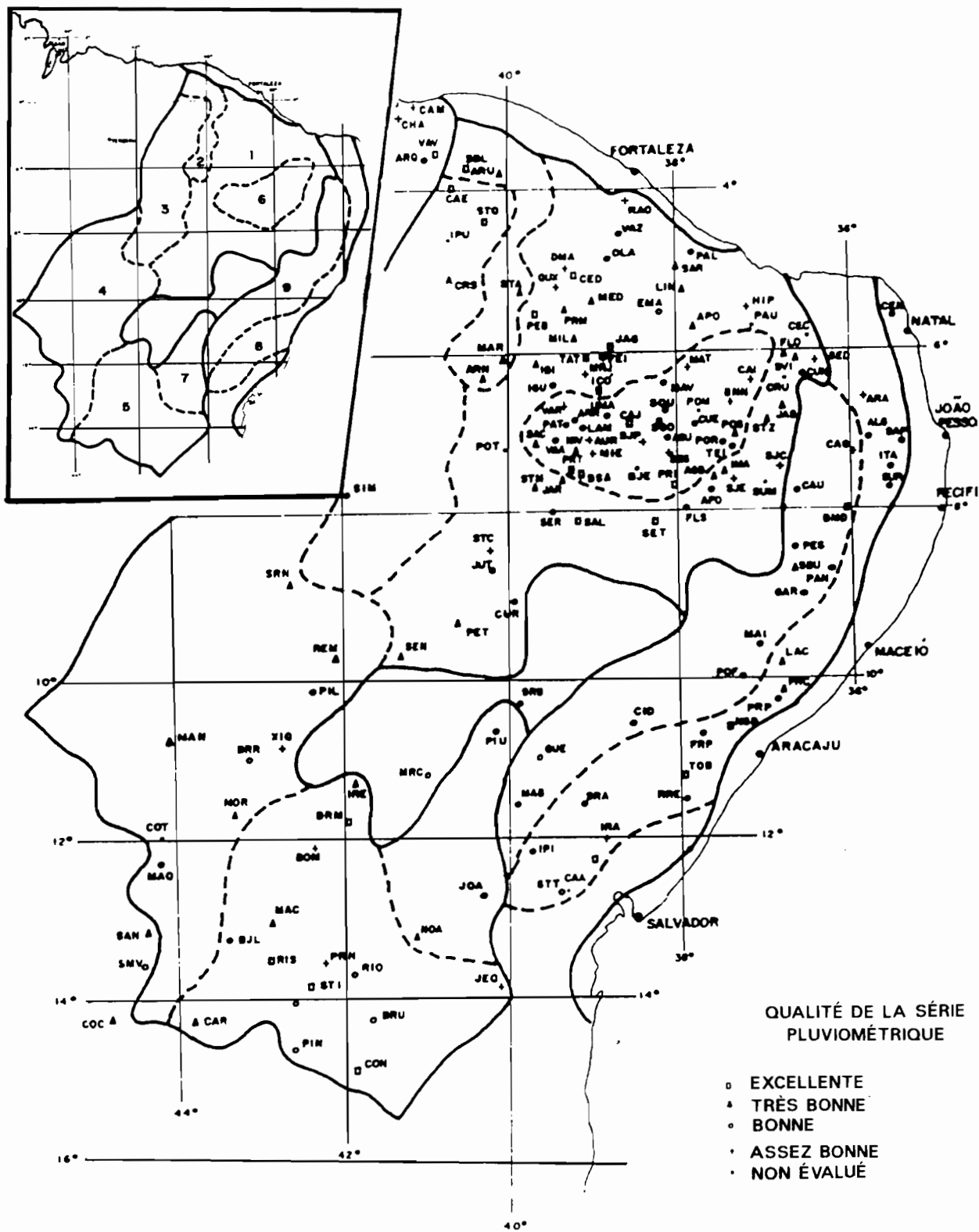


Figure 4.3.1 Zonage pluviométrique initial (en cartouche)
 Figure 4.3.2 Situation des 156 pluviomètres analysés

H = Moyenne homogénéisée au niveau annuel par MOLINIER.

J = Données journalières calculées à partir du fichier de pluviométrie journalière PLV de la SUDENE.

S = Données journalières du fichier que nous utiliserons comme "entrée" pour les modèles. C'est à ce fichier "S" que nous devons, en définitive, garantir la meilleure qualité possible.

Dans le tableau de l'annexe pluviométrique, nous avons reporté les moyennes pluviométriques et le nombre d'années prises en compte par ces quatre fichiers. Les petites différences que nous constatons entre ces diverses valeurs sont normales, puisque les périodes et les modes de traitement des lacunes ne sont pas toujours les mêmes pour chacun de ces fichiers. Par contre, les différences qui dépassent un certain seuil reflètent des incohérences :

- H très différent de M signifie qu'une importante correction a été apportée par MOLINIER au niveau des totaux annuels, correction que nous ne savons pas appliquer au niveau journalier.
- Des données journalières J ou S très différentes des données annuelles M ou H, signifient souvent qu'une partie des données annuelles ne sont pas disponibles au niveau journalier.

b) et c) Cohérence du pluviomètre avec la zone qui l'entoure (critère de qualité B et C).

Deux critères de qualité permettent de comparer le "comportement" du pluviomètre par rapport aux autres pluviomètres de sa zone climatique :

- Le critère B rend compte de la cohérence des totaux en 24 h de faible fréquence, par rapport au reste de la zone.
- Le critère C rend compte de divers autres aspects du régime pluviométrique, irrégularité de la distribution des totaux annuels, séquences d'années déficitaires consécutives et part des crues dans les écoulements que ces séries pluviométriques engendreraient (selon une technique décrite plus loin, au paragraphe 4.3.3.1.).

Une incohérence ou une différence significative entre un pluviomètre et sa région peut refléter des conditions orographiques particulières (micro-climat) ou une mauvaise qualité des données.

d) Qualité de la distribution des totaux en 24 heures (critère de qualité D).

Une analyse des totaux en 24 heures permet de cerner les périodes et les pluviomètres douteux en utilisant des techniques classiques : examen du nombre de jours de pluie, du nombre de fois qu'un total se termine par 0 ou est un multiple de 7 ou de 25 mm⁶, du nombre de jours de pluies inférieurs à 10 mm, examen critique des plus fortes pluies, etc...

6 Le réseau pluviométrique brésilien a été longtemps équipé d'éprouvettes de mesure de 7 et de 25 mm.

* Détermination de la classe de qualité globale .

Quatre classes de qualité ont été établies pour chacun des critères, A, B, C, D selon les conventions suivantes :

- 9 : aucune restriction,
- 8 : acceptable,
- 5 : médiocre,
- 4 : mauvaise, en principe éliminatoire,
- 0 : signifie que le critère n'a pas été évalué.

Les pluviomètres ont ensuite été classés en cinq classes de **qualité globale** numérotées de 0 à 4, la dernière valeur (4) correspondant aux données de meilleure qualité. Cette classe de **qualité globale** intègre les quatre critères définis précédemment.

Tableau 4.3.2 Répartition des pluviomètres par classe de qualité globale

Qualité globale		Condition	Nombre de pluviomètres
EXCELLENTE	4	Quatre "9"	23
TRES BONNE	3	uniquement des "8" ou des "9"	39
BONNE	2	["8" ou "9" pour le Code A] et [(1 x "5" et 2 x ("8" ou "9"))]	58
MOYENNE	1	pas de code "4"	26
DOUTEUSE	0	un ou plusieurs "4"	10

4.3.3. Zonage pluviométrique.

4.3.3.1 Méthode employée - Définition des "faciès" du régime hydrologique.

Nous avons choisi de critiquer, sélectionner et regrouper ces pluviomètres et ces zones à partir des caractéristiques des écoulements fictifs générés par chacun de ces pluviomètres servant tour à tour "d'entrée" à un même modèle. Pourquoi ? Parce que, en fin de compte, le bien fondé du choix des pluviomètres et du zonage, sera ratifié ou validé par leur plus ou moins grande aptitude à être utilisés par des modélisateurs.

Nous avons donc utilisé, tour à tour, chacun des 156 pluviomètres sélectionnés par MOLINIER comme entrée d'un seul modèle, celui de CALDEIRAO⁷.

⁷ Nous avons ensuite répété entièrement l'ensemble de ce processus de regroupement de pluviomètres avec les quatre autres bassins de LUZIMAR, GANGORRA, MICRO-BASSIN-2 de SUME et FAZENDA ISABEL, qui ont été choisis, pour représenter, tout comme le bassin de CALDEIRAO, les cinq grands groupes ou type de bassins identifiés au paragraphe 4.5. Nous avons obtenu avec ces quatre autres bassins des regroupements et une typologie des pluviomètres tout à fait comparables. On peut donc penser que cette technique revient à appliquer un filtrage homogène aux séries pluviométriques. Les biais éventuels de ce filtrage influenceront sur les valeurs numériques trouvées, mais moins sur les regroupements de pluviomètres qui sont peu sensibles au changement de "filtre". Ces regroupements sont pratiquement invariants pour les cinq bassins testés et sont utilisés pour le zonage et la typologie des pluviomètres. Ce raisonnement sera aussi valable quand il s'agira de regrouper des bassins.

Chaque série de débit généré peut être caractérisé par des variables que nous appellerons "**faciès**" du régime hydrologique :

- Son écoulement moyen annuel :	ESCANUAL
- La distribution des écoulements annuels	
Lame décennale humide	LA01
Lame triennale humide	LA033
Lame médiane	LA05
Lame triennale sèche	LA067
Lame décennale sèche	LA09
Lame de trois années consécutives déficitaires	L3AC
- La crue annuelle	X1
- La crue décennale	X10
- La moyenne des précipitations annuelles du pluviomètre :	CHANUAL

Nous utiliserons également ce que nous appellerons les **valeurs relatives** des "faciès" du régime hydrologique, qui sont définies de la manière suivante :

Valeur	décennale relative humide	RLA01 = LA01 / ESCANUAL
	triennale relative humide	RLA033 = LA033 / ESCANUAL,
	etc, jusqu'à	RL3AC = L3AC / ESCANUAL

4.3.3.2 Définition de deux grandes zones climatiques.

Sur la figure 4.3.3., nous avons reporté le logarithme de l'écoulement annuel en fonction de la précipitation annuelle.

Sur cette figure, on peut identifier clairement deux ensembles de points. Le plus élevé correspond aux pluviomètres situés dans la **grande zone climatique** que nous avons appelé **Sertão**, qui regroupe les zones 1 à 7, et qui comprend 128 pluviomètres.

Le nuage inférieur correspond aux pluviomètres situés dans les zones climatiques 8 et 9 qui appartiennent donc à **une même grande zone climatique** que nous avons appelée **TRANSITION**. Elle correspond partiellement à la partie du Nordeste brésilien nommée **Agreste**, intermédiaire entre la zone côtière humide et le Sertão de l'intérieur. Elle comprend 28 pluviomètres.

Ces deux grandes zones climatiques sont reportées sur la figure 4.3.4.

4.3.3.3 Forme de la relation pluie-écoulement annuels.

Nous constatons que, à l'intérieur de chacune de ces grandes zones, la régression entre le logarithme de l'écoulement moyen annuel et la pluie moyenne annuelle peut être considéré comme linéaire sur une plage importante de variation de pluviométrie (de 400 à 1000 ou même 1100 mm).

Ceci signifie qu'une formulation analytique simple peut être établie entre les valeurs moyennes annuelles de l'écoulement (L) et de la précipitation (P) de chaque pluviomètre. Cette relation est de la forme :

$$L(P) = K e^{AP}$$

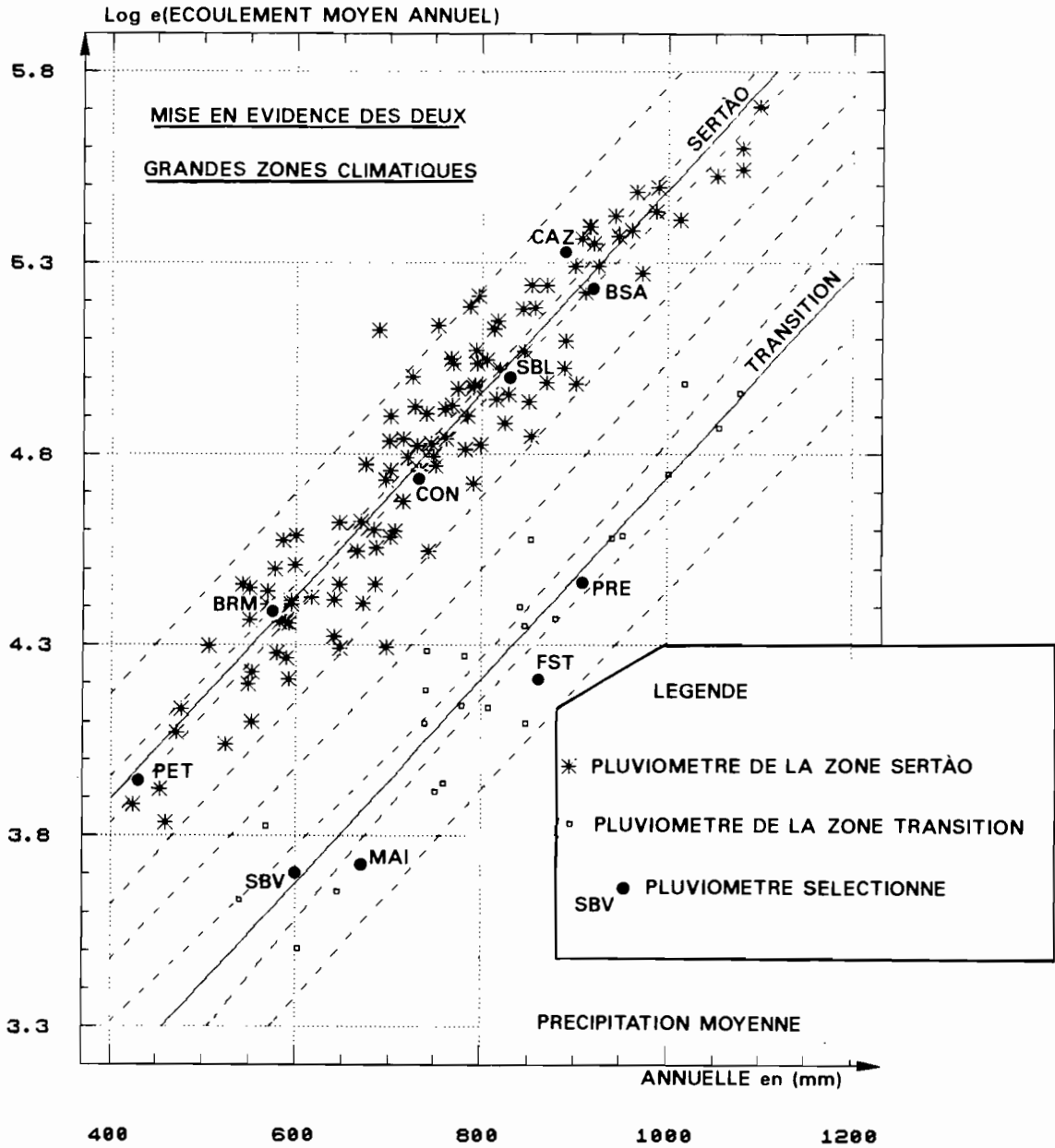


Figure 4.3.3. Mise en évidence des deux grandes zones climatiques

Cette formulation simple, à deux paramètres, constitue, à notre connaissance, une découverte, pour cette région, puisque les différents auteurs qui ont abordé ce problème ont, utilisé un ajustement polynomial (AGUIAR, 1940) ou un ajustement graphique (DUBREUIL *et al*, 1968).

Cette formule peut aussi s'écrire :

$$L(P) = C L_{600} e^{A(P-600)}$$

C est un facteur de correction climatique.

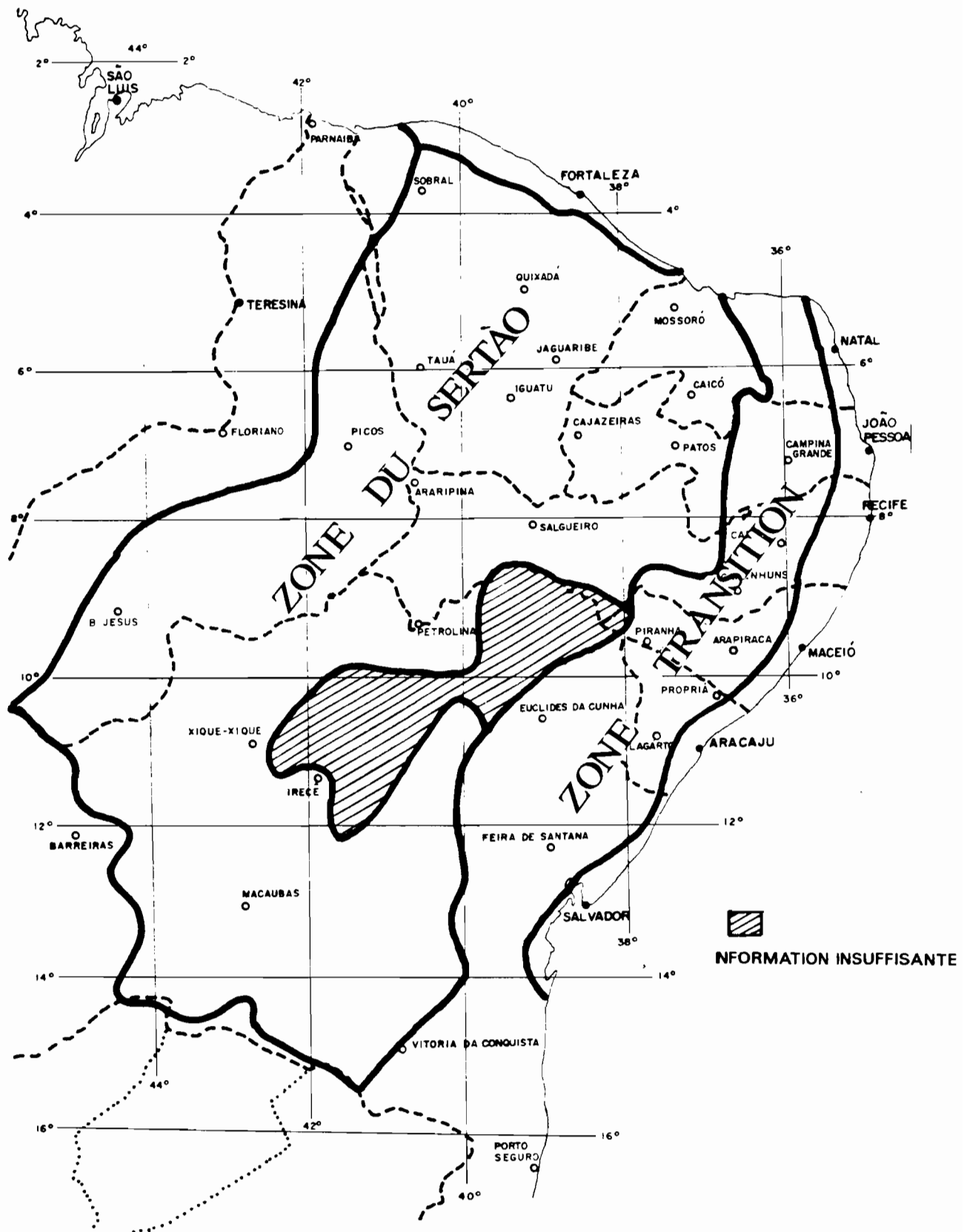


Figure 4.3.4 "Grandes" zones pluviométriques.

Nous avons choisi $C = 1$ pour la zone Sertão . Le coefficient L_{600} est alors défini par l'intersection de la régression entre $L(P)$ et P avec la droite $P = 600$ mm.

L_{600} correspond donc à l'écoulement moyen annuel dans la grande zone climatique Sertão pour une précipitation annuelle moyenne de 600 mm.

Cette formule introduit les deux coefficients, L_{600} et A , qui serviront de base à la typologie des bassins que nous développerons au paragraphe 4.5.

Discussion :

Cette formulation signifie qu'un accroissement donné de la pluviométrie (accroissement arithmétique), induira une multiplication des écoulements par un facteur constant (accroissement géométrique). Ainsi, chaque 100 mm de pluie supplémentaire provoque un accroissement d'environ 40 % des écoulements. Nous n'avons pas d'explication physique simple à proposer pour justifier cette formulation, qui paraît valable sur une plage étendue de pluviométrie annuelle (de 400 à plus de 1000 mm).

Cette formulation est-elle partiellement due à un biais apporté par la modélisation ? Nous ne pouvons répondre à cette question. Nous constaterons cependant, au paragraphe 4.6, que l'allure de la fonction que nous proposons est proche et compatible avec celles proposées par AGUIAR et DUBREUIL, déjà cités. Elle est confirmée par la méthode d'utilisation des données du réseau général que nous proposons plus loin.

Cette formulation ne s'applique qu'aux régions où la majorité des écoulements provient du ruissellement et qui correspond à la plage de validité des modèles, qui ont été conçus pour représenter un fonctionnement hydrologique propre aux régions semi-arides. Nous constatons qu'au delà d'un certain seuil pluviométrique, cette formule ne pourra absolument plus être utilisée, puisque les écoulements peuvent dépasser, d'après l'équation proposée, les pluies. Ceci est à rapprocher des valeurs plus faibles des coefficients A que nous constatons pour les bassins dont les L_{600} sont élevées.

4.3.3.4 La grande zone climatique du Sertão.

Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales nous permet d'évaluer de manière plus fine et de regrouper les pluviomètres à l'intérieur de chaque grande zone climatique.

Nous n'avons pu étudier que 121 des 128 pluviomètres de la grande zone climatique du Sertão, ayant dû éliminer 7 pluviomètres.

Les composantes

Les trois premières composantes expliquent 96.5 % de la variance.

Les variables analysées sont les "faciès" du régime hydrologique définis plus haut⁸. Les individus sont les pluviomètres.

Tableau 4.3.3. Zonage pluviométrique de la zone Sertão .

a) Pourcentage de la variance expliquée par chaque composante.

Tous les pluviomètres			Pluviomètres de qualité 3 et 4		
Composante	Pourcentage de la variance	Pourcentage accumulé	Composante	Pourcentage de la variance	Pourcentage accumulé
1	86.48386	86.48386	1	85.69452	85.69452
2	6.44287	92.92672	2	6.82385	92.51836
3	3.49482	96.42154	3	4.02128	96.53965
4	1.30069	97.72223	4	1.22624	97.76588

Remarquons, tout d'abord, la très grande similitude entre l'analyse effectuée avec tous les pluviomètres et celle effectuée avec les pluviomètres de qualité 3 et 4.

b) Coordonnées des trois premières composantes.

"FACIES"	Tous les pluviomètres			Pluviomètres de qualité 3 et 4		
	1	2	3	1	2	3
LA01	-0.92429	-0.23613	-0.18041	-0.90711	-0.32319	-0.15765
LA033	-0.96428	-0.08973	-0.17346	-0.96695	-0.11351	-0.12046
LA05	-0.96775	0.03648	-0.16938	-0.97236	0.01996	-0.13949
LA067	-0.96469	0.16211	-0.05721	-0.95932	0.10147	-0.12486
LA09	-0.87563	0.41606	0.10059	-0.89026	0.40355	0.06627
L3AC	-0.87608	0.37866	0.16737	-0.84832	0.47899	0.06343
X1	-0.95944	-0.19287	0.09470	-0.96097	-0.17516	0.09021
X10	-0.83988	-0.35216	0.40076	-0.83105	-0.20815	0.50887
ESCANUAL	-0.98593	-0.10359	-0.11059	-0.98110	-0.14077	-0.10955

Le premier axe, qui explique seul plus de 85 % de la variance est prépondérant. Il peut être appelé **axe d'abondance**. Toutes les "variables" y entrent avec un poids équivalent. Nous choisissons naturellement la variable ESCANUAL pour représenter ce premier axe. ESCANUAL correspond à l'écoulement moyen annuel ou encore à la variable L(P) du paragraphe précédent.

⁸ LA01, lame décennale humide, LA033,... jusqu'à LA09 et LA3AC, calculés en utilisant chacun des 121 pluviomètres du Sertão comme "entrée" d'un modèle de simulation hydrologique calé sur la station de CALDEIRAO.

ANALYSE DES "FACIES" DU REGIME

SERTAO

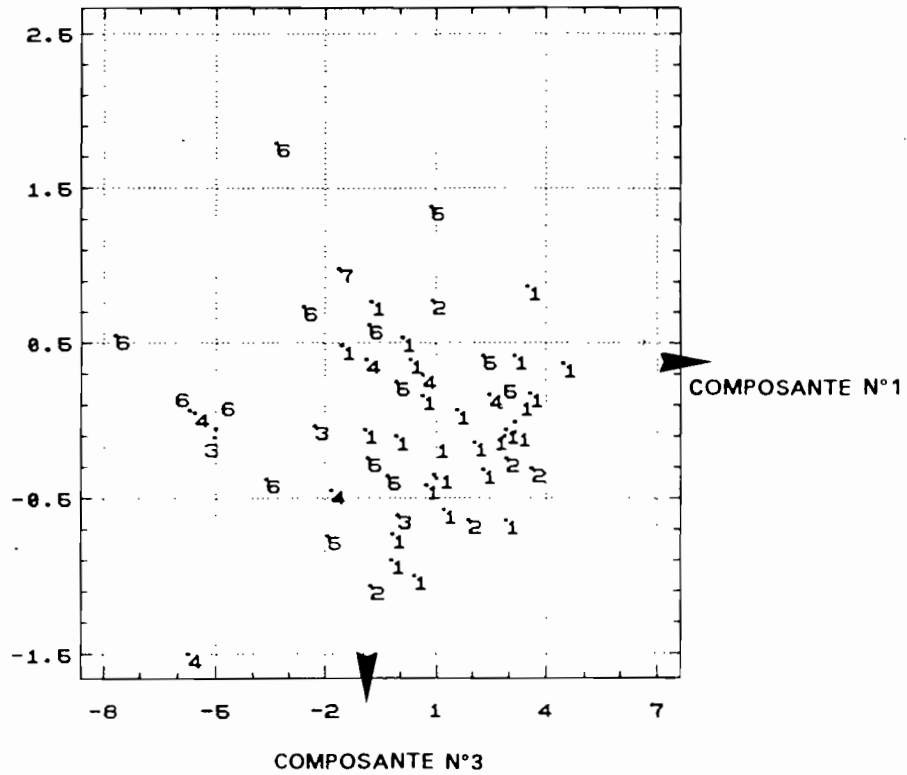
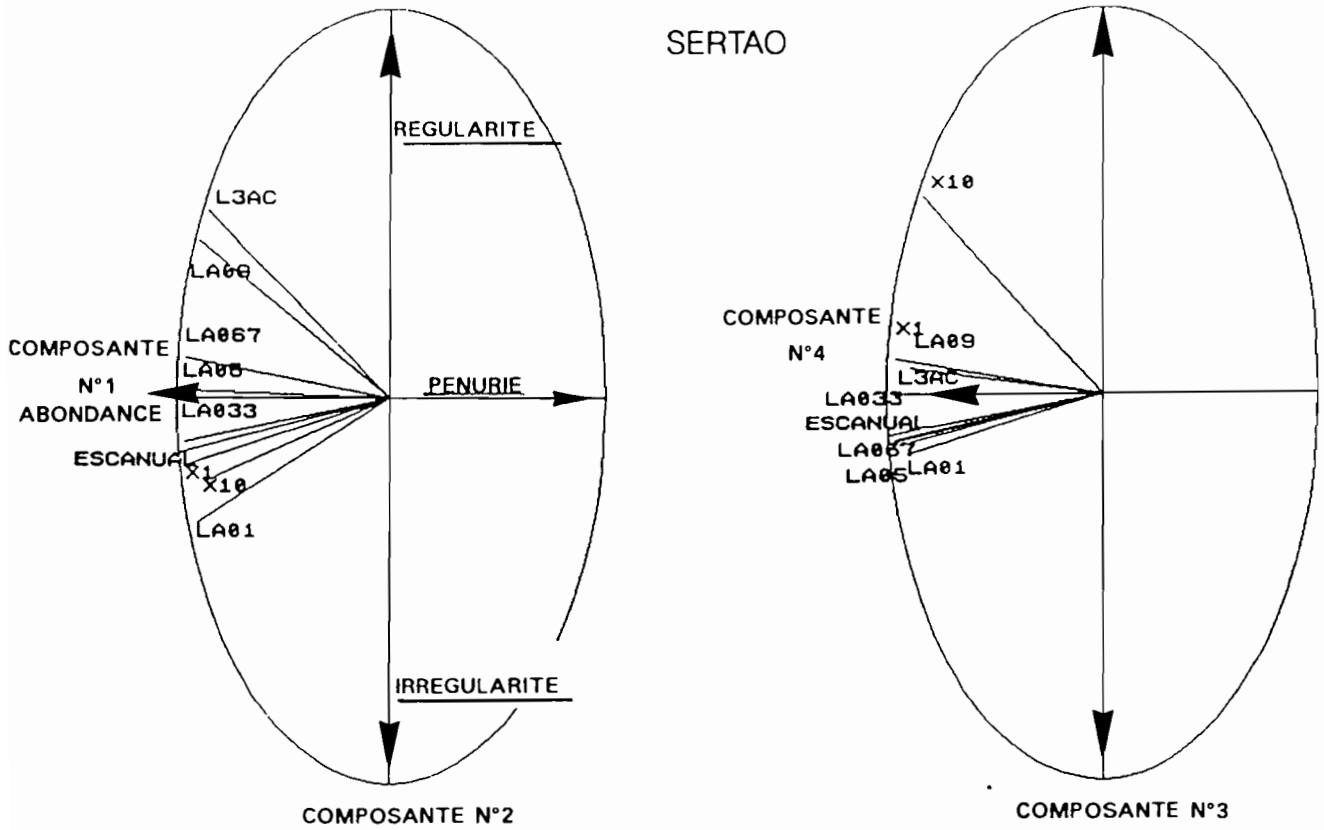


Figure 4.3.5. Analyse des composantes du régime pluviométrique de la zone Sertão.

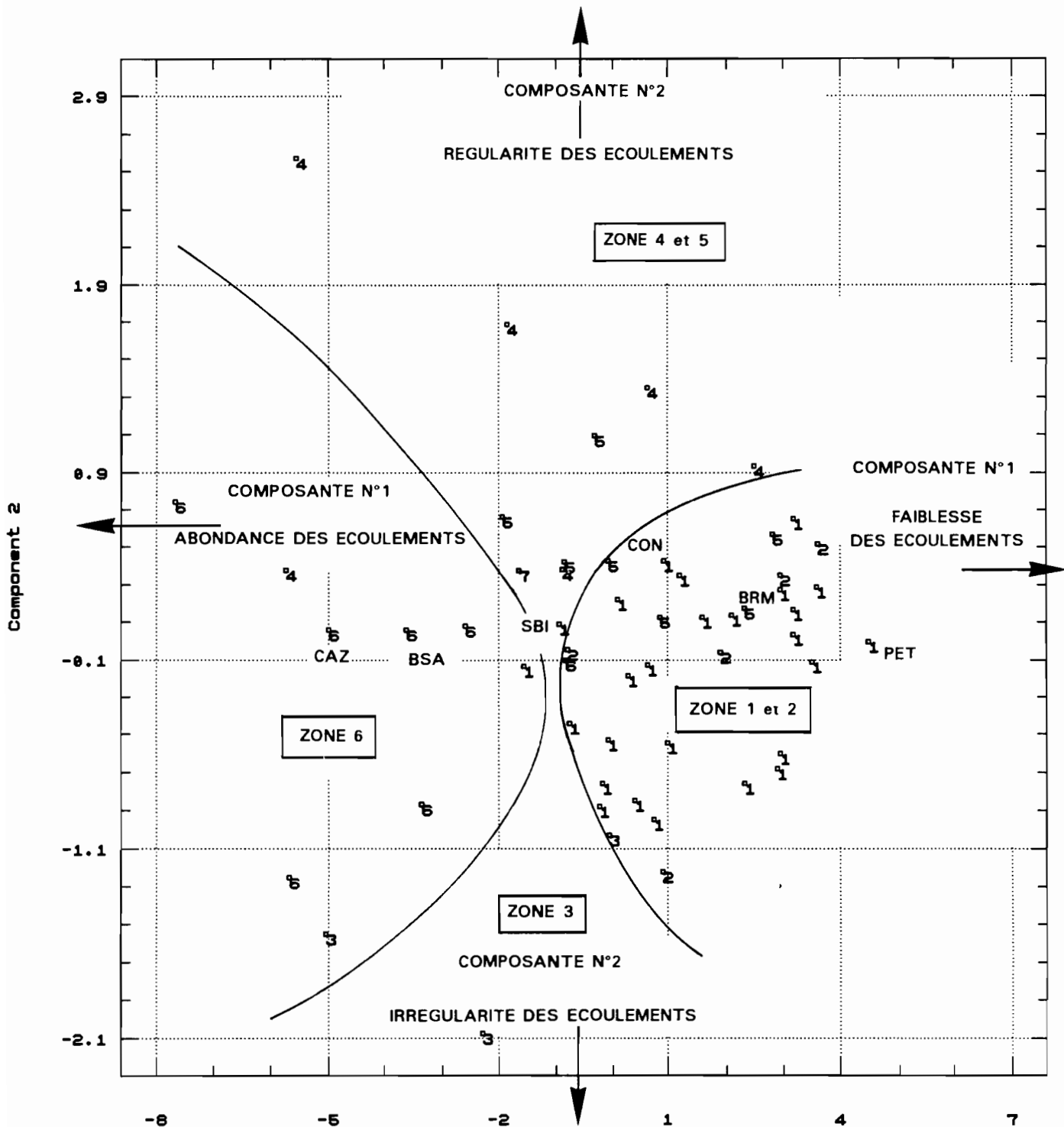


Figure 4.3.6. Les composantes du régime pluviométrique. Regroupement des pluviomètres

Le deuxième axe, qui explique 6 à 7 % de la variance, peut être appelé **axe de régularité**. Les écoulements en années sèches (LA09 et L3AC) s'y opposent aux crues et aux années excédentaires (X10 et LA01). Cet axe peut être représenté par LA09.

Le troisième axe, qui n'explique plus que 4 % de la variance, est d'interprétation plus délicate. Il oppose les années fortes ou normales (LA05, LA033 et LA01) aux crues (X1 et X10). Cet axe pourrait être représenté par X10.

Nous pourrions tenter d'expliquer ce troisième axe de la façon suivante :

"Quand les crues exceptionnelles sont très fortes, les petites crues (celles qui surviennent 5, 10 ou 15 fois par an) devront être, pour compenser, plus faibles. Ceci expliquerait que, paradoxalement, les écoulements des années abondantes et normales dont le volume total est surtout composé de nombreuses petites crues s'opposent aux fortes crues."

Le regroupement des zones pluviométriques.

La figure 4.3.6 situe les pluviomètres de la figure 4.3.1, de qualité 3 et 4, par rapport aux deux premières composantes.

Les deux zones climatiques 1 et 6 y sont nettement différenciées. La zone 6 est caractérisée par une abondance plus élevée. Les autres zones sont représentées par un plus petit nombre de pluviomètres qui rendent les tendances constatées moins significatives.

Les zones 2 et 5 semblent pouvoir cependant être regroupées avec la zone 1, tandis que les zones 3 et 4 paraissent intermédiaires entre les zones 1 et 6. La zone 4 est plus régulière (LA09 élevés et crues faibles). La zone 3 est proche de la zone 5 mais avec un régime plus régulier.

Dans le plan des composantes 2 et 3 reportées sur la figure 4.3.5, les regroupements et leur interprétation sont moins évidents.

Conclusion de l'analyse pour la zone Sertão .

En conclusion, ce zonage nous a permis de définir trois variables explicatives principales des régimes de la Grande zone Sertão . Ces trois variables explicatives sont :

- L'écoulement annuel moyen : ESCANUAL
- La lame annuelle décennale sèche : LA09
- La crue annuelle : X1

Deux regroupements peuvent être proposés pour les 7 zones climatiques initiales de la Grande zone Sertão :

- Les zones 1, 2 et 5
- Les zones 3 et 6 (La zone 3, située en bordure Nord-Ouest du Sertão est la plus irrégulière)

La zone 4, située au Sud-Ouest du Sertão, paraît intermédiaire entre ces deux dernières pour ce qui est de l'abondance, mais nettement plus régulière.

Comparaison des écoulements dans la zone 6 avec le reste du Sertão .

Nous avons cherché, naturellement, à mieux cerner l'abondance (toute relative, il est vrai dans ces régions arides) de la zone 6.

Nous constatons sur la figure 4.3.7. que, vers 600 mm les écoulements annuels moyens, calculés avec les pluviomètres de la zone 6 sont supérieurs de 30 à 40 % à ceux du reste du Sertão. Ces différences s'atténuent quand la pluviométrie s'accroît. Il n'existe pas dans la zone 6 de pluviomètres dont le total soit nettement inférieur à 600 mm.

L'explication de cette **abondance de la zone 6** pourrait être liée à des anomalies de la loi de distribution des fortes pluies. L'explication climatique régionale de cette zone singulière, complètement entourée par la zone 1, moins abondante, reste à trouver. Est-ce que, par hasard, les cumulo-nimbus y seraient plus volumineux ? ou plus fréquents ? et pourquoi ?

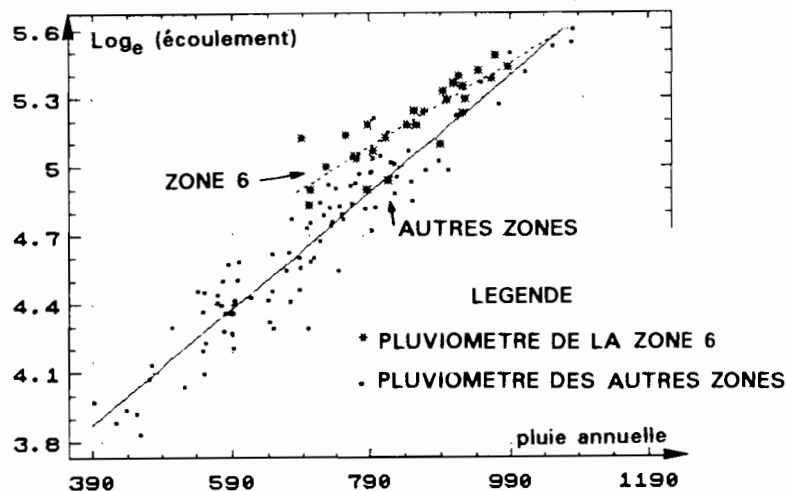


Figure 4.3.7 Mise en évidence de l'abondance de la zone 6

4.3.3.5 La grande zone climatique de Transition.

Nous avons procédé à une analyse en composantes principales des pluviomètres de la zone de Transition, analogue à celle effectuée pour le Sertão. Le nombre de pluviomètres n'est que de 28. Nous avons donc analysé le plus grand nombre possible de pluviomètres.

Nous retrouvons, de la même manière, un axe d'"abondance", qui explique 87% de la variance et un axe de "régularité", qui n'en explique plus que 6 %.

La figure 4.3.8. montre que la zone 8 est en moyenne plus abondante que la zone 9, mais ne permet pas d'effectuer de regroupement de pluviomètres en fonction de leur régularité. La figure 4.3.9. montre que, à pluviométrie égale, ces deux zones ne peuvent pas être clairement différenciées. Nous les réunirons donc, pour la suite de notre étude.

ANALYSE DES "FACIES" DU REGIME

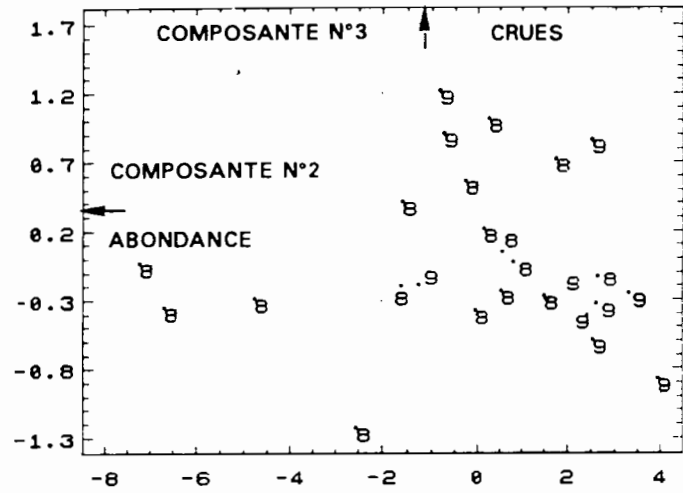
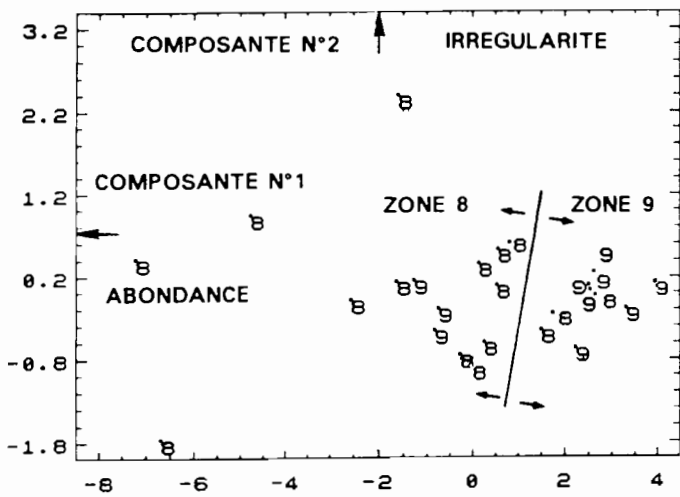
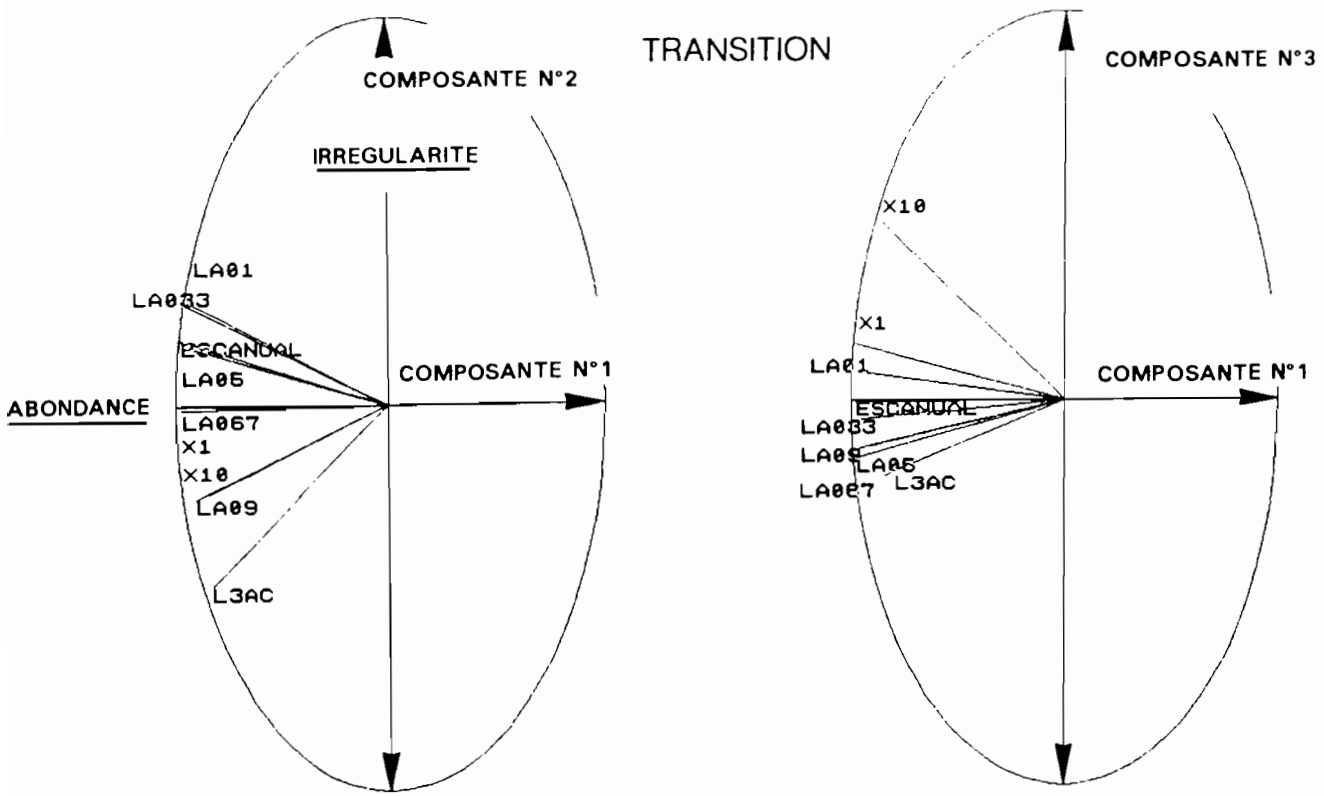


Figure 4.3.8. Analyse en composantes principales du régime pluviométrique de la zone de Transition

Tableau 4.3.4. Zonage pluviométrique de la zone de Transition .

a) Pourcentage de la variance expliquée par chaque composante.

Composante	Pourcentage de la variance	Pourcentage accumulé
1	87.32608	87.32608
2	5.76498	93.09106
3	3.71083	96.80189
4	1.67139	98.47329
5	.72204	99.19532
6	.29967	99.49499
7	.26213	99.75712
8	.13965	99.89677
9	.10323	100.00000

b) Coordonnées des trois premières composantes

"FACIES"	COMPOSANTE		
	1	2	3
LA01	-0.94818	0.26715	0.07094
LA033	-0.95506	0.25944	-0.05254
LA05	-0.96992	0.15393	-0.12730
LA067	-0.96863	0.00175	-0.15079
LA09	-0.90798	-0.24090	-0.12073
L3AC	-0.83898	-0.46653	-0.19966
X1	-0.97746	-0.01314	0.14513
X10	-0.85306	-0.22810	0.46012
ESCANUAL	-0.97863	0.16909	-0.00490

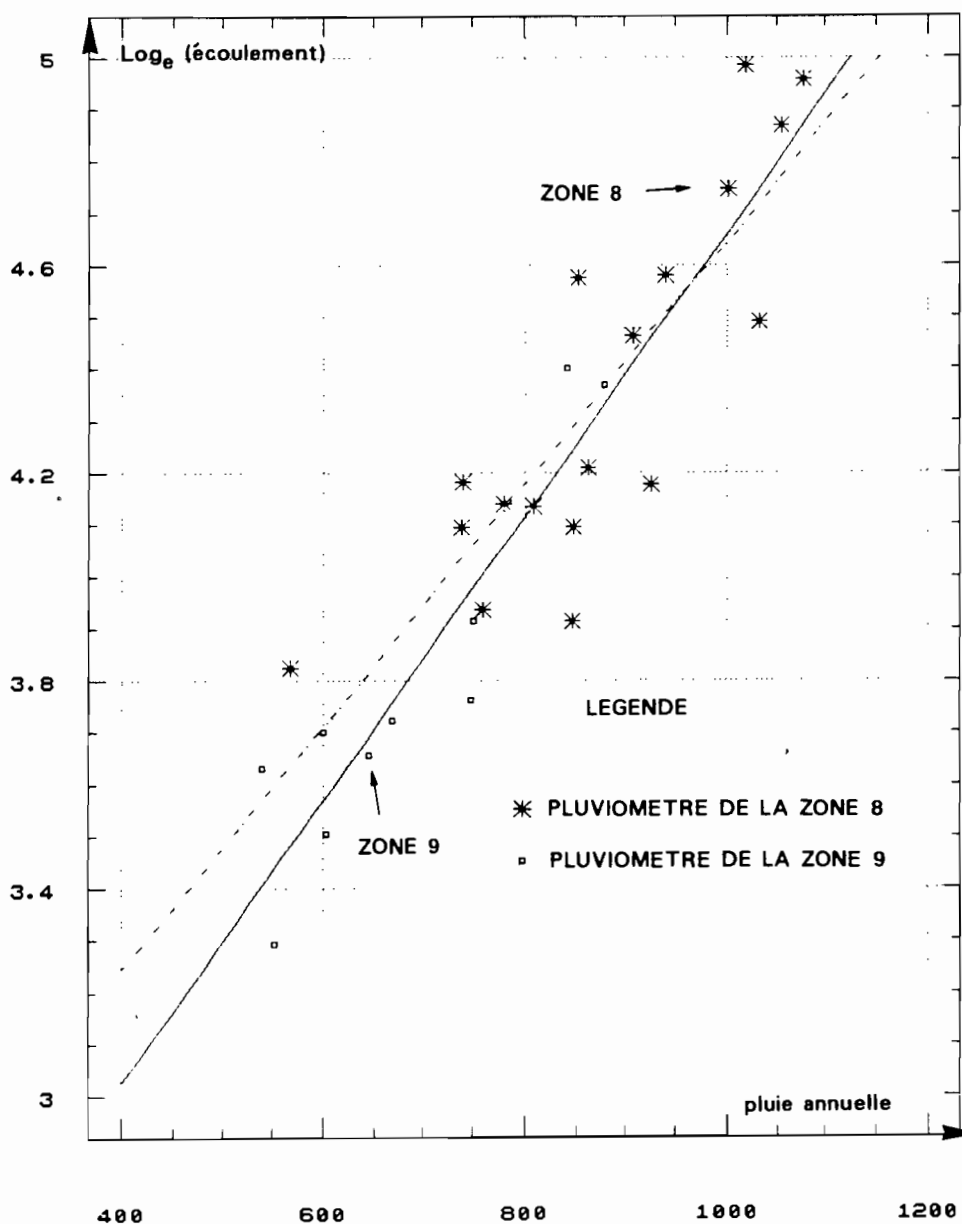


Figure 4.3.9. Comparaison des écoulements des zones 8 et 9.

4.3.4. Sélection finale des pluviomètres.

Pour diminuer le nombre de simulations nécessaire à la comparaison des régimes et à la typologie des 42 bassins, il importe de réduire au maximum le nombre de pluviomètres, tout en s'assurant qu'ils puissent représenter les divers "faciès" des régimes hydrologiques des bassins sur la plus grande plage de variation possible.

Nous avons sélectionné, pour chaque grande zone, le nombre minimum de pluviomètres qui permet de reproduire tous les "faciès" du régime, sans y apporter une trop grande distorsion. Le nombre des pluviomètres de cette sélection finale s'élève à 6 pour la Grande zone du Sertão et à 4 pour celle de Transition. Une liste complémentaire signale 5 autres pluviomètres d'excellente qualité, que nous aurions pu également utiliser sans altérer de manière significative les résultats finaux.

Ces pluviomètres ont également été choisis pour assurer la meilleure "couverture géographique" possible du Nordeste semi-aride. Il est remarquable de constater, par exemple, que les "faciès" du régime hydrologique du pluviomètre de Barra dos Mendes (BRM), situé à près de 1000 km au sud de Sobral (SBL), soient finalement semblables, alors que les mécanismes climatiques et les distributions saisonnières des précipitations y sont bien différents !

Tableau 4.3.7. Liste des pluviomètres sélectionnés.

GRANDE ZONE :	C H O I X						F I N A L				LISTE COMPLEMENTAIRE				
	S E R T A O						TRANSITION				S E R T A O				
Pluviomètre	PET	BRM	CON	SBL	CAZ	BSA	SBU	MAI	FST	PRC	SAL	SET	FEI	ICO	TAT
Zone climatique	1	5	5	2	6	6	9	9	8	8	1	1	1	1	1
Total annuel(mm)	439	576	733	825	894	922	600	668	863	910	570	580	770	730	800

Les pluviomètres sélectionnés ont été également reportés sur la carte de situation, sur le graphique de relation pluie-débit et sur ceux des composantes principales.

Validation du choix de ces 10 pluviomètres.

Le tableau 4.3.8. met en évidence et résume les distorsions induites par la sélection des pluviomètres. Les chiffres présentés dans ce tableau ont été calculés selon le mode opératoire suivant :

- Calcul de la régression entre chaque "faciès" du régime hydrologique et l'écoulement moyen.
- Calcul de la moyenne de trois points correspondant au bas, au milieu et à la partie haute de chaque régression, c'est à dire à des pluviométries de 400, 600 et 800 mm.
- Ces calculs sont successivement effectués avec tous les pluviomètres, avec les pluviomètres sélectionnés, puis avec ceux de qualité 4.

Ce tableau 4.3.8. indique les rapports entre les moyennes calculées avec les trois ensembles de pluviomètres signalés.

Ce mode opératoire fournit, pour chaque "faciès" du régime, une indication globale de la distorsion induite par la diminution du nombre de pluviomètres : une valeur de 1,0 correspondant aux plus faibles distorsions.

Tableau 4.3.8. Validation du choix des pluviomètres sélectionnés

Grande zone climatique : "faciès" du régime hydrologique	S E R T A O		T R A N S I T I O N	
	Sélectionnés/Tous	Sélectionnés/Q4	Sélect./Tous	Sélect./Q4
MOYENNE	0,99	1,00	0,96	1,09
LA01	0,96	0,97	1,12	1,12
LA033	1,07	1,06	0,96	0,93
LA05	1,04	1,00	0,99	0,96
LA067	1,04	1,08	1,10	1,08
LA09	1,07	1,04	0,84	0,91
L3AC	1,01	1,08	1,43	1,41
X1	1,00	1,00	0,99	1,04
X10	1,00	1,00	1,38	1,45

Zone Sertão :

La sélection des pluviomètres n'influe pratiquement pas sur la moyenne, ce qui est normal, puisque le choix de ces 6 pluviomètres a été fait, tout d'abord, pour laisser cette moyenne invariante.

Bien que restant dans les limites de l'acceptable, ces 6 pluviomètres ne respectent pas aussi bien la distribution fréquentielle des totaux annuels de l'ensemble de l'échantillon. Le plus fort écart relatif étant de 8 % pour les lames de fréquence triennale humide, les écarts étant d'ailleurs de sens opposé entre les lames décennales et triennales humides.

La sélection de ces six pluviomètres est le fruit d'essais nombreux et laborieux. Les autres combinaisons de pluviomètres que nous avons été amenés à tester occasionnent des écarts relatifs globalement supérieurs. Cette dispersion est normale ; il serait surprenant et paraîtrait même suspect d'arriver, avec un si petit nombre de pluviomètres, à une meilleure reconstitution de la distribution de l'ensemble des pluviomètres. En effet les séries pluviométriques ont une durée inférieure à 60 - 80 ans et les valeurs proposées pour une fréquence donnée ont été calculées par une simple interpolation entre les valeurs dont la fréquence encadre la fréquence recherchée. Aucun ajustement statistique ne vient donc "lisser" les marches d'escalier de la distribution expérimentale.

Zone de Transition :

Les distorsions induites par la sélection sont nettement plus élevées que dans la zone climatique du Sertão . Elles reflètent la plus grande complexité des régimes de cette zone intermédiaire. La faible taille de l'échantillon de pluviomètres de bonne qualité rend plus incertain la découverte de l'assortiment idéal que nous recherchons. L'erreur induite par la sélection est forte, de l'ordre de 40 % pour les années sèches consécutives, (L3AC) et les crues décennales, (X10).

La figure 4.3.10 montre la distorsion apportée aux différents "faciès" du régime induite par la sélection et par la réduction du nombre de pluviomètres.

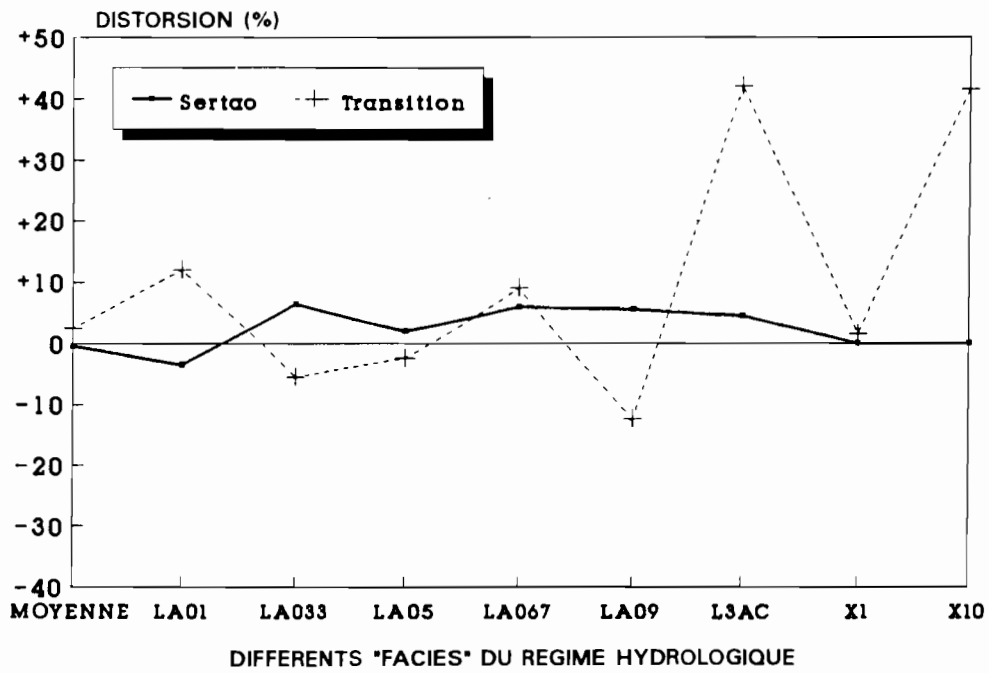


Figure 4.3.10 Distorsion induite par la sélection des pluviomètres

4.4 L'ABATTEMENT DES PLUIES.

4.4.1. Rappel théorique

La loi de distribution statistique des pluies moyennes calculées sur un bassin de surface S est différente de celle des pluies ponctuelles. ROCHE (1963) définit le coefficient d'abattement⁹ R des pluies pour une période de retour T et une surface S comme étant le rapport :

$$R = \frac{\text{Pluie moyenne sur la surface S de période de retour T}}{\text{Pluie ponctuelle de même période de retour T}}$$

Les modèles de simulation ont été calés sur des chroniques des pluies moyennes calculées sur chaque bassin. Il convient donc, de corriger par un coefficient d'abattement les séries pluviométriques ponctuelles qui serviront "d'entrée" au même modèle qui sera utilisé pour obtenir des séries de débits fictives dites "de longue durée".

NOUVELOT *et al* (1979) proposent l'abaque reproduite sur la figure 4.4.1., qui représente les variations du coefficient d'abattement en fonction de la surface et de la fréquence de la pluie ponctuelle. Cet abaque a été établi à partir des relevés effectués pendant sept ans sur les 44 pluviomètres du bassin du Riacho de Navio. Les valeurs proposées par NOUVELOT *et al* sont nettement supérieures à celles obtenues par VUILLAUME (19KK) en Afrique qui propose l'équation suivante :

$$R = 1 - (9 \log F - 43. 10^{-3} P + 152 \pm 10) * 10^{-3} . \log(S)$$

4.4.2. Coefficient d'abattement proposé pour les fortes pluies

L'application de l'abaque proposée par Nouvelot *et al* conduit, pour une surface de 500 km², à adopter un coefficient d'abattement R de 0,70 pour des pluies de 105 mm et de 0,76 pour des pluies de 60 mm. Ces pluies de 105 et 60 mm correspondent respectivement aux périodes de retour décennales et annuelles.

Tableau 4.4.1 Comparaison des coefficients d'abattement proposés par VUILLAUME et NOUVELOT

S(km2)		1	10	50	100	500
Proposé par Vuillaume	F = 1 an	1,0	0,873	0,78	0,75	0,66
	F = 10 ans	1,0	0,864	0,77	0,73	0,63
	F = 100 ans	1,0	0,855	0,75	0,71	0,61
Proposé par Nouvelot	F = 1 an	-	-	0,89	0,87	0,76
	F = 10 ans	-	-	0,85	0,83	0,71
	F = 100 ans	-	-	0,80	0,78	0,67

⁹ En portugais, coefficient d'abattement se traduit par coeficiente de redução

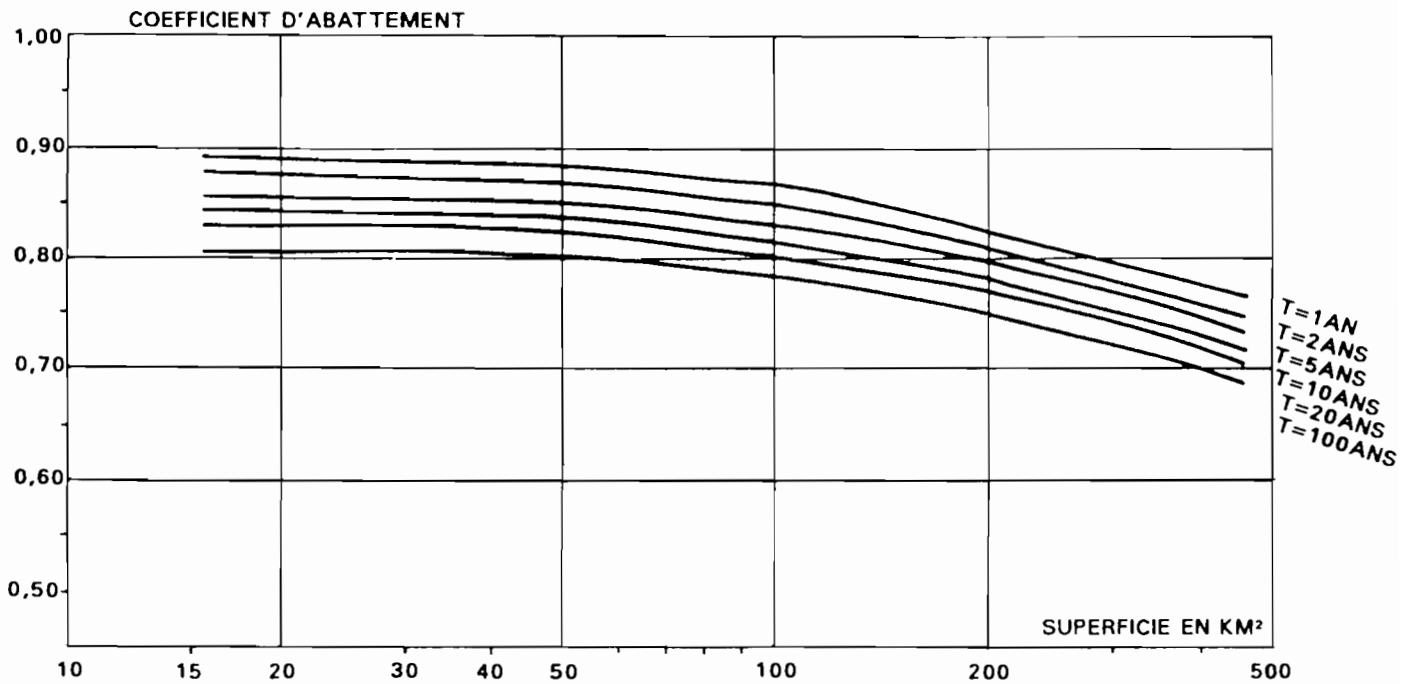


Figure 4.4.1 Coefficient d'abattement en fonction de la surface du bassin et de la période de retour de la pluie ponctuelle (selon NOUVELOT *et al*)

4.4.3. Correction pour les faibles pluies

L'application de ces coefficients d'abattement des fortes pluies provoque une diminution des totaux annuels. Pour compenser cette diminution, il faudra soit appliquer aux faibles pluies un coefficient d'abattement supérieur à l'unité, soit augmenter le nombre de jours de pluie.

L'allure de la courbe $R = f(P \text{ journalière})$ correspond donc au schéma suivant :

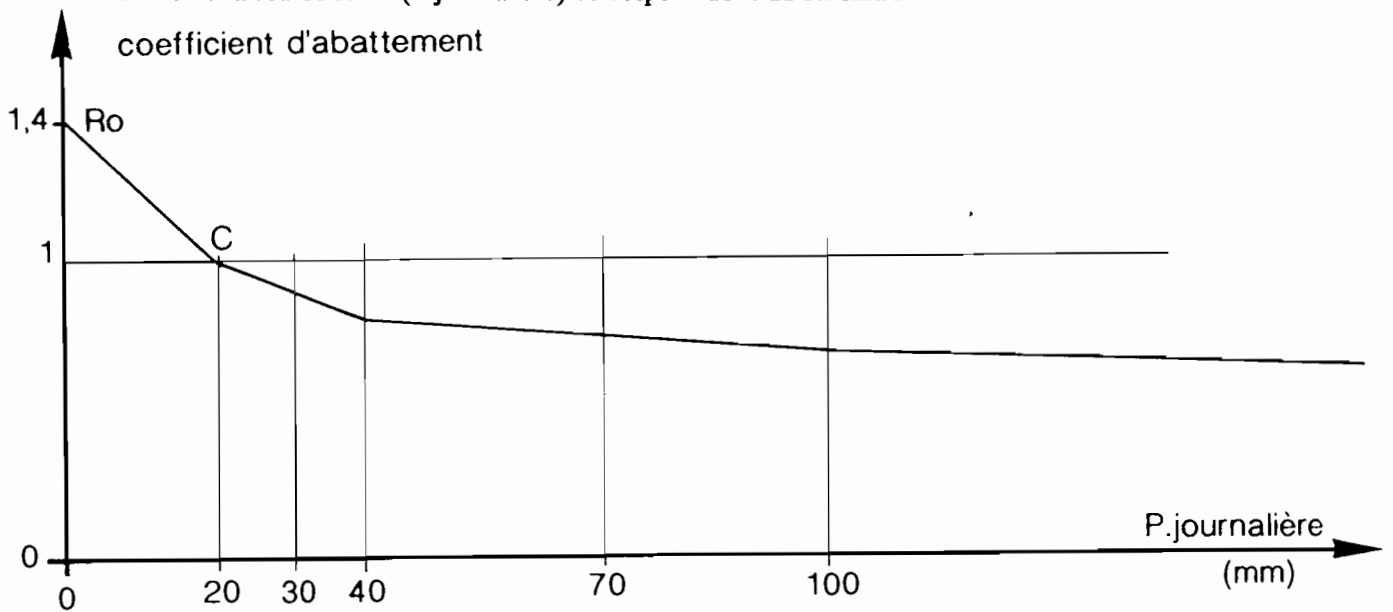


Figure 4.4.2 Variation du coefficient d'abattement en fonction de la pluie journalière (pour un bassin de 500 km^2)

Il existe une hauteur de pluie "charnière" en dessous de laquelle le coefficient R est supérieur à l'unité. Par approximations successives, nous avons adopté une valeur de 20 mm pour cette pluie "charnière". En assimilant la courbe $R_0.C$ à une droite, nous avons calculé, ensuite, pour les séries journalières des 23 pluviomètres reportés sur le tableau 4.4.2. l'ordonnée du point R_0 qui permet de compenser la diminution des totaux pluviométriques annuels apportées par le coefficient d'abattement.

Tableau 4.4.2 Coefficient R_0 pour différents pluviomètres

Sigle	Pluviomètre	P. annuelle	R_0	Sigle	Pluviomètre	P. annuelle	R_0
SUR	SURUBIM	1050	1,13	CED	CEDRO	820	1,44
TIM	TIMBAUBA	650	1,24	ARU	ARACATIACU	650	1,41
MAI	MAJOR ISIDORO	670	1,18	DMA	DOM MAURICIO	1000	1,40
PRC	PORTO REAL DO COLEGIO	900	1,17	PRI	PRINCESA ISABEL	820	1,68
LIN	LIMOEIRO DO NORTE	730	1,45	SUM	SUME	560	1,49
-	CRATO	1090	1,91	CRU	CRUZETA	560	1,41
JAR	JARDIM	780	1,59	-	SANTA CRUZ	530	1,29
IRE	IRECE	580	1,58	SET	SERRA TALHADA	630	1,48
BJL	BOM JESUS DA LAPA	830	1,51	AFO	AFOGADOS DA INGAZEIRA	590	1,52
FRP	FREI PAULO	820	1,19	BET	BETANIA	520	1,48
NSD	NOSSA SENIORA DAS DORES	1050	1,21	PET	PETROLINA	430	1,63
-	MAMANGUAPE	1370	1,44				

R_0 semble indépendant de la pluviométrie annuelle du pluviomètre. Sa moyenne est proche de 1,40.

4.4.4. Formules de correction proposées

Faute d'informations plus consistantes, nous proposons de calculer l'abattement des pluies à l'aide de deux tableaux, entre lesquels il faudra effectuer des interpolations linéaires.

Nous proposons donc les coefficients d'abattement du tableau suivant, pour un bassin de 500 km² :

Tableau 4.4.3 Coefficient d'abattement R en fonction de la pluie journalière, pour un bassin de 500 km².

P journalière (mm)	0	20	30	40	70	100	200
Coefficient d'abattement R	1,40	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65

Pour des surfaces inférieures à 500 km², nous avons calculé, toujours à partir du même abaque de NOUVELOT, le tableau suivant qui permet de moduler la correction définie pour 500 km².

Tableau 4.4.4 Coefficient de correction r à appliquer en fonction de la surface

Surface du bassin (S)	30	50	100	200	300	400	500 km ²
Coefficient de correction à appliquer (r)	0	0,25	0,45	0,70	0,80	0,90	1,00

Pour calculer le coefficient d'abattement d'un bassin de surface quelconque, on appliquera la formule :

$$\text{Abattement final} = 1 - r(1 - R)$$

Utiliser ensuite les deux tableaux 4.4.2. et 4.4.3. en interpolant linéairement sur P et sur S.

Exemple de calcul :

Calculons, par exemple, l'abattement sur un bassin de 150 km^2 correspondant à une pluie ponctuelle de 50 mm :

$$R = 0,8 + \frac{(0,75 - 0,80) \times (50 \text{ mm} - 40 \text{ mm})}{(70 \text{ mm} - 40 \text{ mm})} = 0,783 \quad \text{pour } 500 \text{ km}^2$$

$$r = 0,45 + \frac{(0,70 - 0,45)(150 \text{ km}^2 - 100 \text{ km}^2)}{(200 \text{ km}^2 - 100 \text{ km}^2)} = 0,625$$

$$\text{Abattement final} = 1 - 0,625(1 - 0,783) = 0,865 \quad \text{pour } 150 \text{ km}^2$$

Ainsi, une pluie ponctuelle de 50 mm correspondra donc à une pluie moyenne de $50 \times 0,865 = 43,2 \text{ mm}$ sur un bassin de 150 km^2 .

Cet exemple reproduit l'algorithme utilisé dans le modèle SUDENE/ORSTOM .

4.4.5. Discussion - Pertinence de l'abattement

Hypothèses effectuées

Les abaques et tableaux que nous proposons sont le résultat d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Ces hypothèses concernent tout d'abord les valeurs de R proposées, puis l'existence et la valeur de la pluie "charnière" et enfin la linéarité des variations du coefficient d'abattement en fonction de la pluie journalière, entre l'origine et la pluie "charnière".

Un autre choix de "pluie charnière" aurait, bien évidemment, conduit à un R_0 différent.

Conséquence sur les modules de bassin de surface supérieure à 30 km^2

Le tableau suivant permet de comparer les lames moyennes interannuelles calculées avec et sans application de coefficient d'abattement pour les 7 plus grands bassins étudiés.

Tableau 4.4.5 Conséquence de l'abattement des pluies sur le calcul des écoulements annuels

Sigle	Bassin	Surface (km ²)	Coefficient r	$\frac{\text{Écoulement avec abattement}}{\text{Écoulement sans abattement}}$
PIR	PIRANGI	194	0,60	0,76
GA2	GANGORRA	137	0,50	0,79
MAT	MATRIZ	470	1,00	0,73
OSB	OSCAR BARROS	45	0,25	0,91
LGR	LAGOA GRANDE	321	0,75	0,69
BPC	BATATEIRAS	203	0,70	0,78
MVE	MISSAO VELHA	323	0,80	0,77

Le coefficient d'abattement a été conçu initialement pour corriger les volumes et débits de crues.

Nous constatons que la **diminution de l'écoulement annuel** provoqué par l'introduction dans le modèle SUDENE/ORSTOM de l'abattement des pluies est loin d'être négligeable, puisqu'elle est de l'ordre de 20 à 30 % pour des bassins de surface supérieure à 100 km². Ainsi, pour cette taille de bassin, une modification des hypothèses sur les coefficients R, r, R₀ ou encore de la pluviométrie charnière, doit entraîner une variation importante de l'estimation des écoulements annuels.

Conséquences sur la méthode de transposition

Cependant, les conséquences d'une erreur éventuelle sur l'utilisation des coefficients d'abattement des pluies devront être finalement relativement modestes sur la typologie des bassins et l'ensemble de la méthode de transposition que nous élaborons. D'une part, parce que l'abattement que nous proposons ne doit être appliqué qu'à 15 % des bassins étudiés. D'autre part, parce que nous avons constaté que les mécanismes hydrologiques sur ces grands bassins étaient malheureusement trop complexes pour avoir un rôle "moteur" dans l'élaboration de la typologie de bassins, et qu'ils seront naturellement réservés à un rôle de validation et de vérification des hypothèses.

4.5 TYPOLOGIE DES BASSINS.

"L'objectif est de dégager des relations entre variables hydrologiques et paramètres du milieu, à l'aide d'observations conjointes" (DUBREUIL et al., 1975)

4.5.1. Caractérisation et regroupement de bassins.

4.5.1.1 L'abondance : la moyenne des écoulements.

L'analyse en composantes principales, que nous avons effectuée au chapitre précédent lors de la sélection des pluviomètres, nous a montré que ce que nous avons appelé "axe d'abondance" expliquait plus des trois quarts de la variance des régimes hydrologiques. Cet axe d'abondance peut être représenté par le module ou l'écoulement moyen annuel.

Les coefficients L_{600} et A permettent de calculer ce module $L(P)$, pour chaque zone climatique, en fonction de la pluviométrie P , en appliquant la formule :

$$L(P) = L_{600} * e^{A(P-600)}$$

Nous avons calculé, pour chacun des 42 bassins, les coefficients L_{600} et A correspondant aux deux grandes zones climatiques, en utilisant les six pluviomètres PET, BRM, CON, SBL, CAZ et BSA sélectionnés pour la grande zone climatique "Sertão" et les quatre autres pluviomètres de SBU, MAI, FST et PRT, pour la grande zone "transition".

Distribution des coefficients L_{600} :

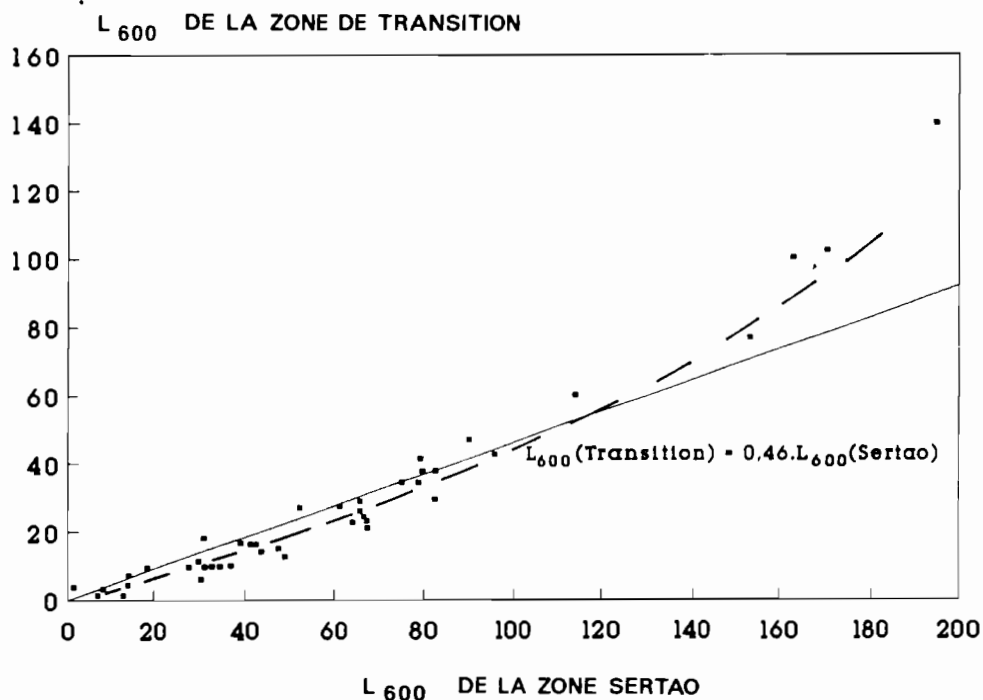


Figure 4.5.1 Comparaison des coefficients L_{600} des deux zones climatiques

Nous constatons que les coefficients L_{600} de la zone Sertão sont significativement différents de ceux de la zone de Transition, dans un rapport moyen de 0,46

$$L_{600} \text{ de la zone TRANSITION} = L_{600} \text{ de la zone SERTA O} \times 0,46$$

Tableau 4.5 1 Valeurs de L_{600} et de A pour les deux grandes zones climatiques

	Bassin	Groupe	Grande Zone climatique			
			SERTA O	A	TRANSITION	A
			L_{600}		L_{600}	
LUZ	LUZIMAR	1	170.10	0.0023	102.39	0.0021
S33	Micro-bassin 33 SUME	1	195.08	0.0017	139.77	0.0014
S43	Micro-bassin 43 SUME	1	162.91	0.0020	100.16	0.0017
MNO	MUNDO NOVO	2	67.60	0.0026	22.98	0.0029
MOQ	MOQUEM	2	82.36	0.0032	29.53	0.0033
JOF	JOAO FRAGOSO	2	66.85	0.0031	24.42	0.0032
ACD	ACUDINHO	2	64.24	0.0031	22.72	0.0032
CAL	CALDEIRAO	2	82.52	0.0028	37.78	0.0024
CHI	CHICO	2	61.22	0.0027	27.43	0.0025
NAS	NASCIMENTINHO	2	78.91	0.0028	34.45	0.0026
MIT	Micro-bassin 1 TAUA	2	89.89	0.0023	46.82	0.0018
M2T	Micro-bassin 2 TAUA	2	79.38	0.0022	41.34	0.0018
M3T	Micro-bassin 3 TAUA	2	95.50	0.0026	42.49	0.0023
S31	Micro-bassin 31 SUME	2	66.05	0.0025	28.94	0.0020
S32	Micro-bassin 32 SUME	2	114.16	0.0022	60.03	0.0018
S41	Micro-bassin 41 SUME	2	66.02	0.0028	26.04	0.0024
S42	Micro-bassin 42 SUME	2	79.84	0.0023	37.59	0.0018
JER	JERICO	2	153.42	0.0029	76.74	0.0029
RPI	PIRANGI	3	42.32	0.0025	16.18	0.0026
M4T	Micro-bassin 4 TAUA	3	32.98	0.0033	9.88	0.0035
GA2	GANGORRA 90	3	31.43	0.0033	9.69	0.0032
JA2	JATOBA 90	3	36.95	0.0037	9.96	0.0040
UM1	UMBURANA 81	3	28.01	0.0026	9.57	0.0025
UM2	UMBURANA 90	3	43.47	0.0029	14.21	0.0030
RMA	MATRIZ	3	34.69	0.0043	9.77	0.0047
SAL	SALOBRE	3	47.20	0.0035	15.07	0.0039
JU1	JUATAMA 64	3	67.77	0.0036	20.90	0.0036
JU2	JUATAMA 75	3	48.62	0.0041	12.65	0.0047
QUI	QUIXABINHA	3	41.19	0.0027	16.29	0.0024
MAN	MANOEL	3	30.10	0.0033	11.27	0.0039
MS1	Micro-bassin 1 SUME	4	6.73	0.0028	1.38	0.0038
MS2	Micro-bassin 2 SUME	4	12.75	0.0039	1.41	0.0061
ROS	OSCAR BARROS	4	30.66	0.0053	6.02	0.0060
JUZ	JUAZEIRO	5	51.90	0.0027	27.05	0.0025
RLG	LAGOA GRANDE	5	1.31	0.0031	3.70	0.0045
LBA	LAJEDO DE BAIXO	5	18.43	0.0029	9.37	0.0029
FZI	FAZENDA ISABEL	5	7.96	0.0024	3.31	0.0023
FZP	FAZENDA PASSAGEM	5	13.94	0.0025	4.41	0.0030
RBP	BATATEIRAS P. Car.	5	39.02	0.0029	16.60	0.0028
RMV	MISSAO VELHA	5	13.99	0.0024	7.21	0.0020
AJA	ACUDE JARDIM	5	75.34	0.0027	34.45	0.0026
PCO	PEDRO COSTA	5	31.19	0.0019	18.14	0.0014

Les coefficients L_{600} et A du tableau 4.5.1 ont été calculés en utilisant des figures analogues à la figure 4.3.3 du paragraphe précédent, de la manière suivante :

- Le coefficient L_{600} de la grande zone climatique Sertão est l'intersection de l'ajustement réalisé avec les pluviomètres du Sertão et la droite verticale $P = 600$ mm,
- Le coefficient A de la grande zone climatique Sertão est la pente de cet ajustement,
- idem pour les coefficients L_{600} et A de la zone Transition (en utilisant l'ajustement réalisé pour la zone Transition).

Dans ce tableau, les bassins ont été réunis selon les groupes qui seront définis au paragraphe 4.5.1.2

Distribution des coefficients A :

- Inversement les moyennes des coefficients A des deux zones sont très proches et non significativement différentes, malgré un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,93$). La moyenne des coefficients A du Sertão est de 0,00292 et celle de ceux de la zone de Transition de 0,0030. La moyenne des coefficients A dont le L_{600} (Sertão), inférieur à 60 mm, est de l'ordre de 0,0033, valeur que nous retiendrons.
- La figure 4.5.2. suggère une relation en forme de "S" : les faibles valeurs de la zone Sertão correspondront à des A encore plus faibles dans la zone de Transition et inversement.

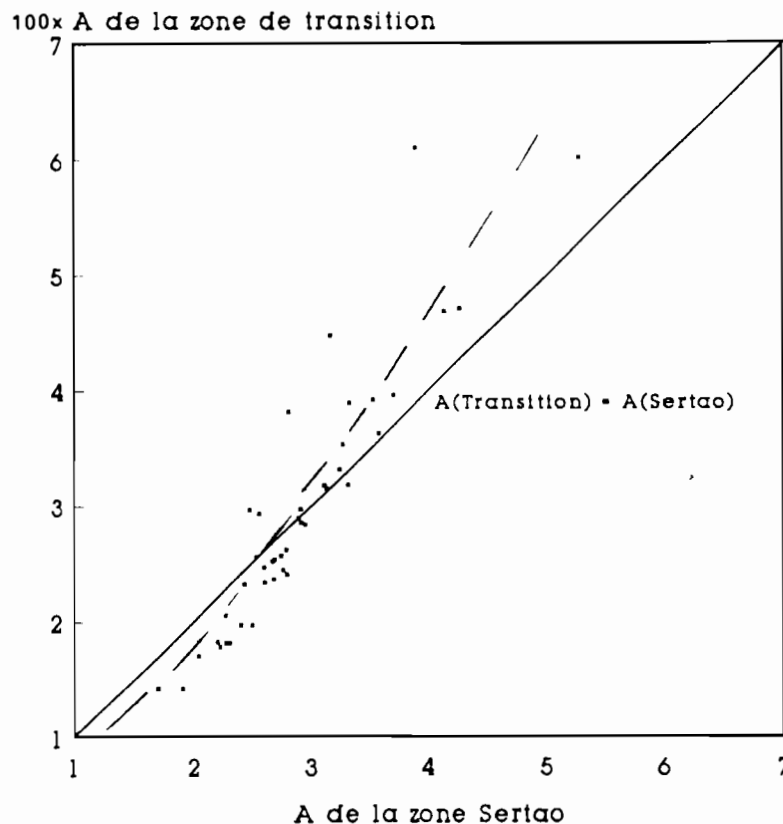


Figure 4.5.2 Comparaison des coefficients A des deux zones climatiques

Relation entre L_{600} et A :

On trouve une légère corrélation négative entre le coefficient A et L_{600} ($R^2 = 0,14$), l'équation de la régression étant : $A = (3,2 - 0,006 L_{600}) / 100$

Ceci signifie que les écoulements des bassins dont les L_{600} sont élevées, seront un peu moins sensibles aux variations pluviométriques, ce qui semble logique.

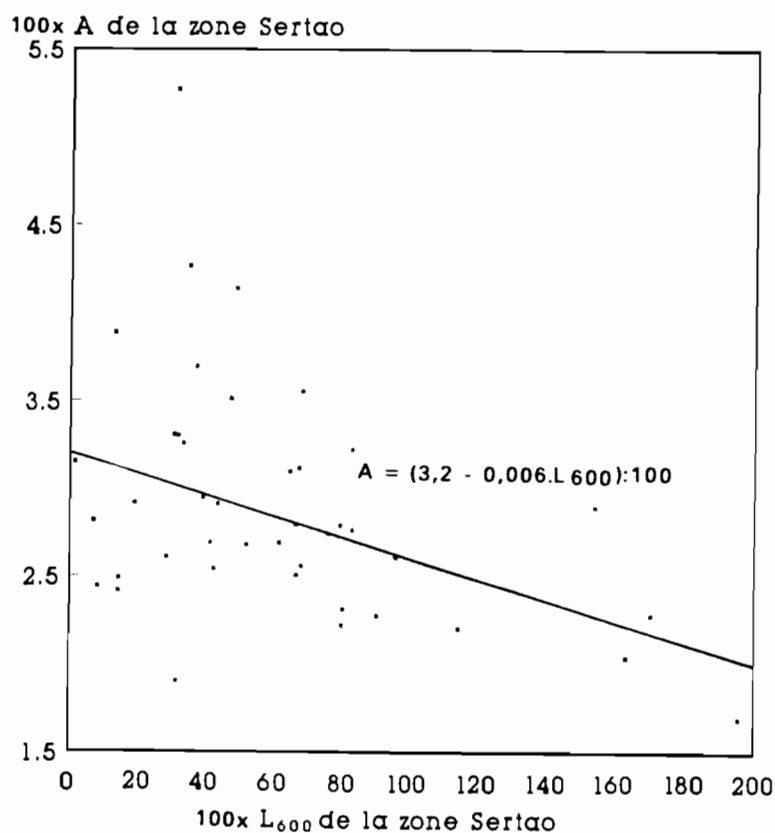


Figure 4.5.3 Coefficient L_{600} en fonction de A, pour la zone climatique Sertão

4.5.1.2 Les "faciès" des régimes : variabilité et regroupements de bassins.

■ Choix des critères à analyser

Une analyse plus fine des divers aspects des régimes hydrologiques que nous avons appelés "faciès" passe par une abstraction de l'abondance, première et principale composante des régimes, qui tend à masquer toutes les autres, puisque les écoulements de diverses fréquences d'un bassin donné sont, en première approximation, proportionnels au module. La cohérence des résultats ultérieurs confortera cette hypothèse. Nous utiliserons donc, naturellement, des "variables réduites", qui seront égales au rapport de chaque aspect du régime divisé par l'écoulement moyen annuel.

Ainsi, la lame annuelle décennale humide réduite RLA01, est définie comme le rapport entre la lame annuelle décennale humide LA01 et la lame moyenne annuelle $L(P)$: $RLA01 = LA01/L(P)$; les autres

RLA01 = LA01/L(P) ; les autres lames réduites sont définies de manière analogue : RLA033 = LA033/L(P) ; RLA05 = LA05/L(P) ; RLA067 = LA067/L(P) ; RLA09 = LA09/L(P) ; RL3AC = L3AC/L(P).

Les lames des crues ne sont que très faiblement dépendantes des modules, nous conservons donc leurs valeurs "absolues" X1 et X10.

■ Analyse en composantes principales

Nous avons effectué une analyse en Composantes Principales (ACP) des résultats obtenus en utilisant les modèles ajustés sur les 42 bassins, avec comme donnée d'entrée l'unique pluviomètre de SOBRAL (SBL).

Les figures 4.5.4 a) et b), ainsi que les tableaux 4.5.2 a) et b) fournissent les principaux résultats d'une ACP effectuée avec toutes les variables réduites mentionnées ci-dessus, en utilisant les 42 bassins. Nous constatons, bien-sûr une certaine similitude avec les résultats de l'analyse des régimes pluviométriques, qui avait été effectuée, rappelons-le, en utilisant des variables "absolues":

- Les trois premières composantes expriment 97% de la variance.
- La première composante exprime 66% de la variance et peut être appelée **axe de régularité**. Elle oppose ainsi les lames décennales sèches et humides.
- La deuxième composante exprime 18% de la variance et peut être appelée **axe de crue**.
- La troisième composante exprime encore 11% et oppose la lame annuelle triennale humide (ou médiane) à la lame décennale sèche. Il est difficile de lui trouver une signification physique simple.

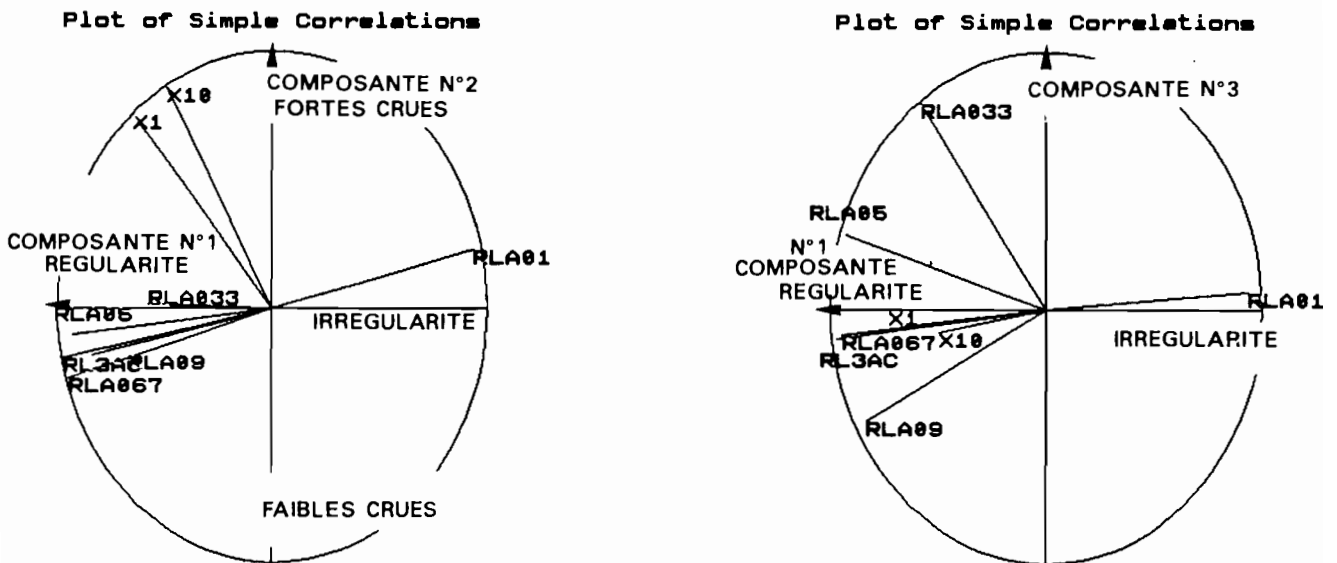


Figure 4.5.4 Typologie des bassins: a) analyse des composantes

Plot of Principal Components

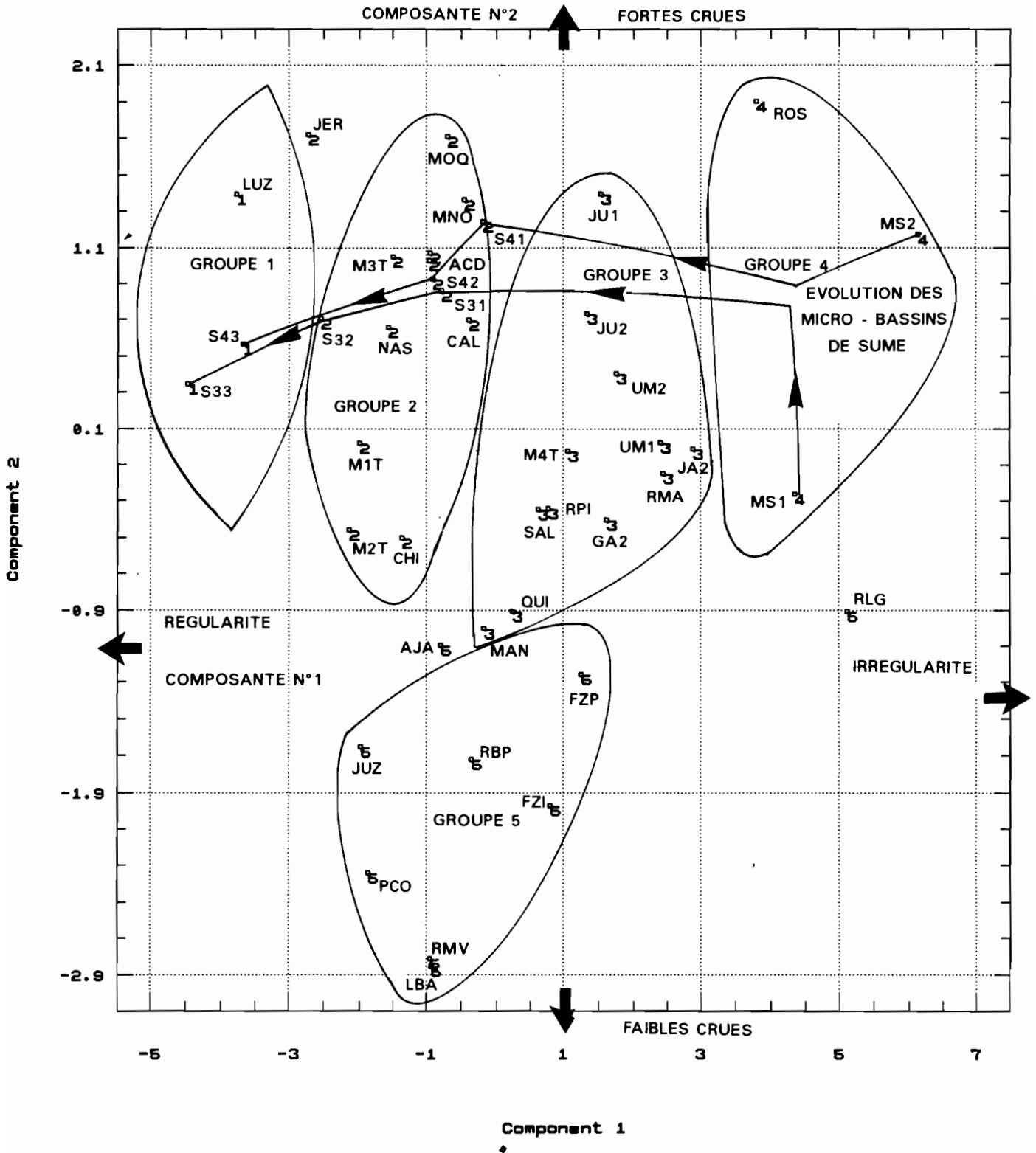


Figure 4.5.4 Typologie des bassins: b) regroupement des bassins

Tableau 4.5.2 Typologie des bassins : Analyse en composantes principales

Component Number	Percent of Variance	Cumulative Percentage	FACIES	COORDONNEES DES COMPOSANTES		
1	66.24140	66.24140	RLA01	0.93752	0.22646	0.06767
2	18.79572	85.03712	RLA033	-0.58329	0.01164	0.79661
3	11.94985	96.98697	RLA05	-0.92936	-0.10929	0.28995
4	1.62471	98.61168	RLA067	-0.94475	-0.27839	-0.10211
5	.72379	99.33547	RLA09	-0.83971	-0.18588	-0.44272
6	.39858	99.73405	RL3AC	-0.96808	-0.19879	-0.11721
7	.16194	99.89598	X1	-0.65547	0.74674	-0.06667
8	.10402	100.00000	X10	-0.50192	0.85505	-0.09022

■ Regroupement des bassins

L'ACP permet de regrouper les bassins de la façon suivante :

Les quatre premiers groupes de bassins s'ordonnent dans le sens d'une abondance et d'une régularité décroissantes :

* **Le plus régulier est le groupe N° 1.** Il est composé de bassins qui "coulent" beaucoup. Leurs L_{600} sont supérieures à 150 mm. Sur les trois bassins de ce groupe, on observe des phénomènes de dégradation du sol et de la végétation ainsi que des croûtes ou pellicules de battance.

Au cours des années les plus déficitaires, un écoulement, bien que faible, est toujours observé, ce qui nous permet de qualifier ce groupe de régulier et abondant. Nous avons choisi le bassin de **LUZIMAR (LUZ)** pour représenter ce groupe. Nous utiliserons parfois le qualificatif de "impluvium", pour ce type de bassin.

* A l'opposé, le **groupe N° 4**, que nous pouvons qualifier de faible et irrégulier, est composé de bassins qui ne présentent que de **très faibles écoulements**, les valeurs de L_{600} sont inférieures à 20 ou 30 mm et la proportion d'années sans aucun écoulement est souvent supérieure à 50 %. Ce groupe est représenté par des bassins extrêmement bien protégés par une végétation dense, sur lesquels on n'observe, évidemment, aucune trace de dégradation ou d'érosion des sols. Les écoulements sont donc très faibles, irréguliers et concentrés sur quelques rares années. Les crues de faible fréquence pourront être néanmoins encore fortes. Nous avons choisi le **Micro-bassin N° 2 de SUME (MS2)** pour représenter ce groupe dont les ressources risquent de décevoir nombre de constructeurs d'açudes...

* **Les groupes 2 et 3 sont intermédiaires** entre ces deux extrêmes. Ils représentent la plus grande partie des petits bassins du Nordeste.

La lame L_{600} des bassins du groupe 2 est comprise entre 50 et 150 mm. Nous avons choisi le bassin de CALDEIRAO (CAL) pour représenter ce groupe 2, composé de bassins généralement petits et caractérisés par un écoulement relativement abondant et régulier.

La lame L_{600} des bassins du groupe 3 est comprise entre 20 et 50 mm. Ces bassins, plus grands, comportent souvent des zones susceptibles de retenir de l'eau, ce qui accentue l'irrégularité en retenant totalement les faibles écoulements lors des années déficitaires. Nous avons choisi le bassin de GANGORRA (GA2) pour représenter ce groupe 3.

Le cinquième groupe est constitué de bassins sur sols épais ou situés sur des formations géologiques sédimentaires. Ils présentent des écoulements plus faibles ; L_{600} est généralement inférieure à 30 mm. Ce groupe est avant tout caractérisé par des crues moins importantes. Nous avons choisi le bassin de Fazenda Isabel (FZI) pour représenter ce groupe.

■ Régularité et abondance vont de pair :

Nous avons reporté les valeurs de L_{600} de tous les bassins sur le graphique 4.5.5. Or ce graphique a été établi dans le système d'axes des variables relatives. Il est intéressant de noter que les L_{600} s'ordonnent parfaitement par rapport à l'axe de régularité.

■ Evolution d'un bassin suite au défrichement.

Nous pouvons constater sur la figure 4.5.5, dans le plan des deux premières composantes, l'évolution avec le défrichement des micro-bassins du bassin expérimental de SUME.

Les micro-bassins 1 et 2 (MS1 et MS2) représentent les conditions initiales avant tout défrichement, quand les bassins sont encore protégés par une épaisse caatinga. Ces micro-bassins sont classés dans le groupe de bassin N° 4.

Après défrichement, les micro-bassins N° 3 et 4 évoluent et traversent trois phases qui correspondent à des dégradations successives des sols. Nous constatons bien cette évolution sur la figure 4.5.4 sur laquelle les bassins évoluent depuis la position S31 ou S41, qui correspond à la première phase de ces deux micro-bassins, jusqu'à la position S33 ou S43 de la troisième phase, qui reflète l'état de la dégradation extrême de la surface de leurs sols qui les place alors dans le groupe N° 1, en passant par les comportements intermédiaires S32 ou S42.

Entre ces deux positions extrêmes, l'écoulement moyen s'accroît d'un facteur de 20, tandis que sa régularité croît fortement, caractéristiques ô combien favorables au stockage de l'eau !

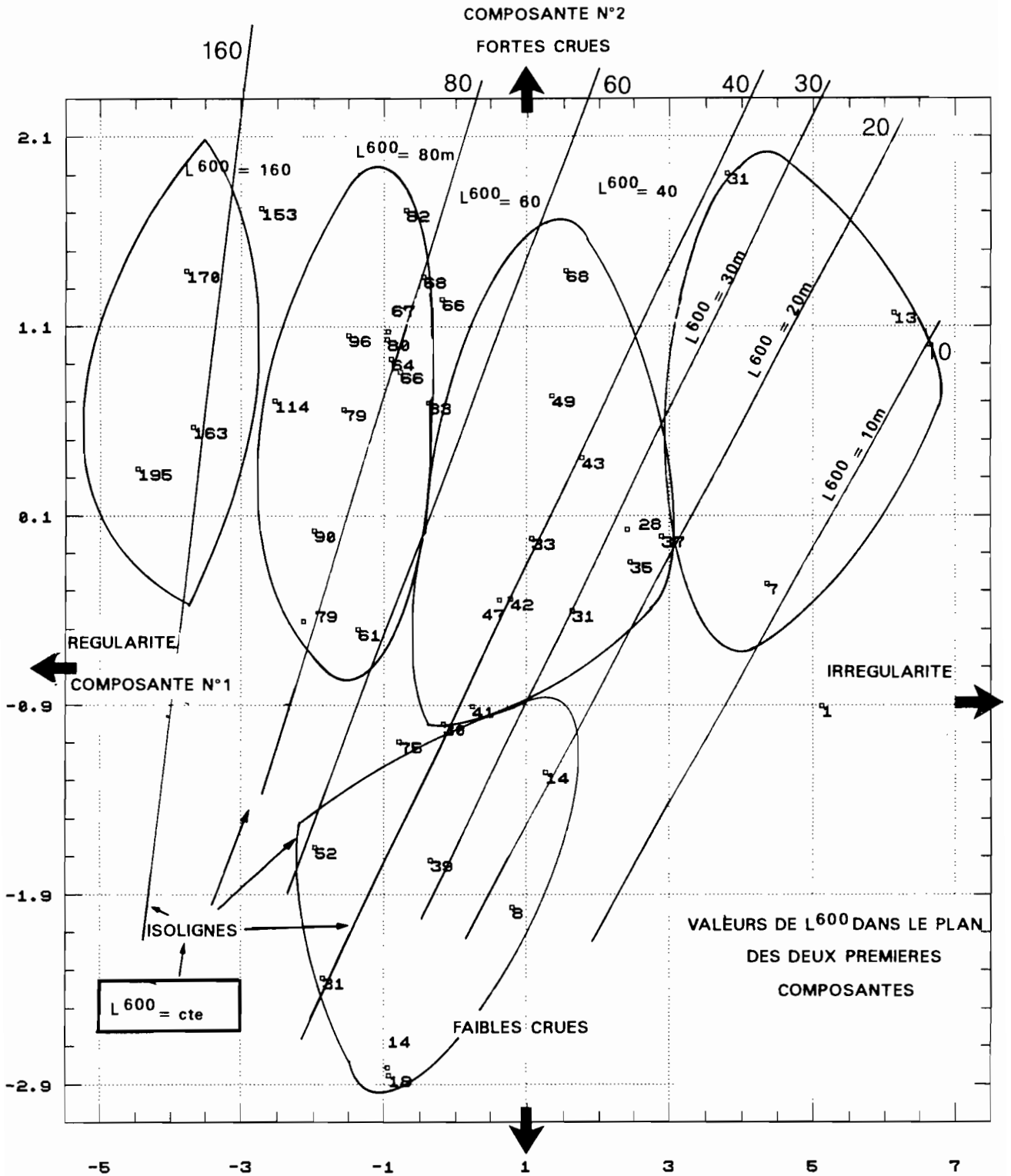


Figure 4.5.5 Typologie des bassins: Régularité et abondance

4.5.2. Caractérisation numérique des régimes.

Le tableau 4.5.3 contient les coefficients des régressions linéaires calculés pour chacun des groupes de bassins, pour les différents "faciès" du régime, en fonction de la lame moyenne écoulée.

Le graphique 4.5.6 montre l'une des meilleures de ces régressions ($LA05 = f(L(P))$), établie pour les bassins du groupe N° 1, ainsi qu'une moins bonne : ($L3AC = f(L(P))$) avec $r = 0,90$ pour le groupe 3).

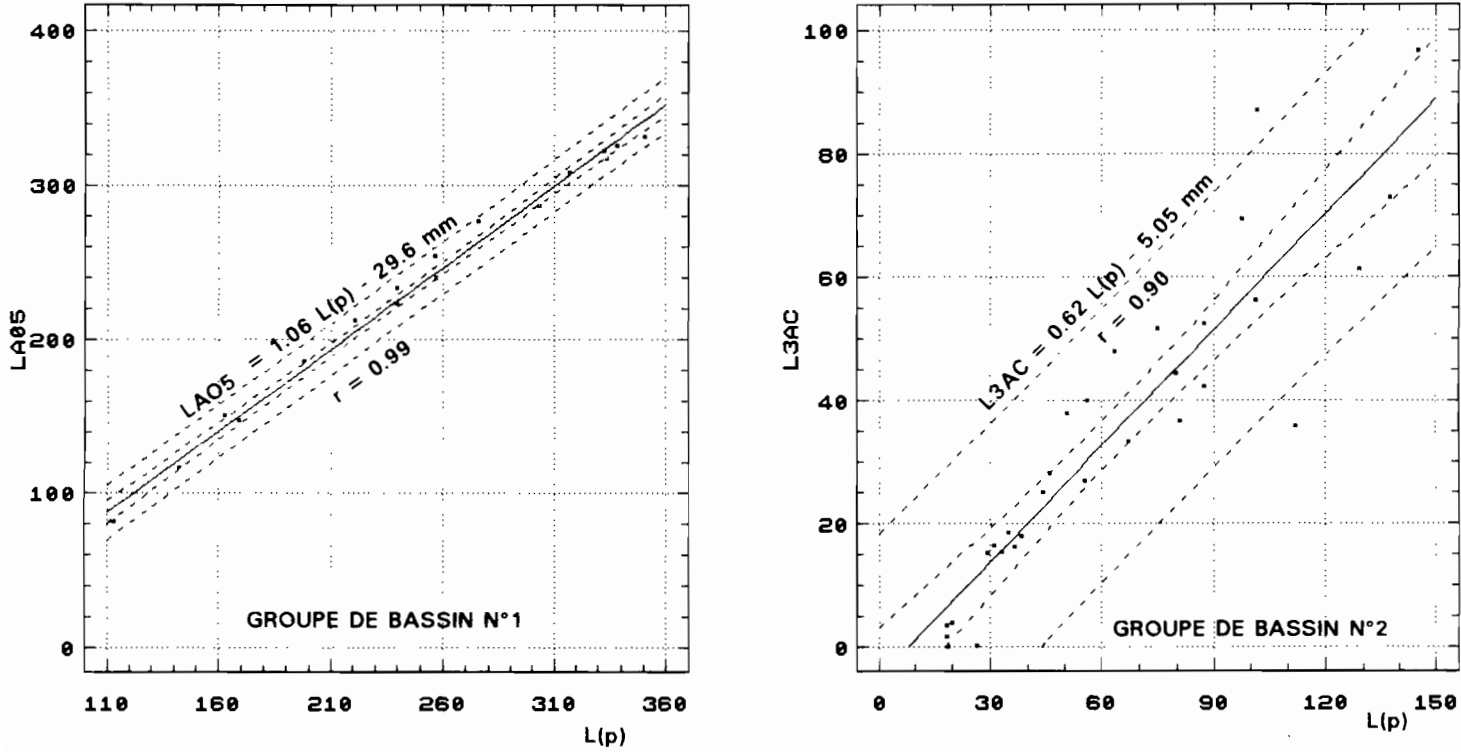


Figure 4.5.6. Exemple de deux régressions entre "faciès" du régime et module

Tableau 4.5.3 Régressions entre les "faciès" du régime hydrologique et le module (L(P)), pour les cinq groupes de bassins. Grande zone climatique du Sertão.

Bassin -->		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Plage de validité ->		110-360 mm	50-350 mm	20-150 mm	8-70 mm	0-100 mm
Faciès	Nombre de bassins	3	15	12	3	9
LA01	a	1,49	1,73	2,20	2,95	1,73
	b	47,75	35,02	8,90	- 2,98	5,44
	r	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
LA033	a	1,03	1,11	1,10	0,78	1,14
	b	30,77	5,71	- 2,11	0,09	1,28
	r	0,99	0,99	0,98	0,97	0,99
LA05	a	1,06	0,95	0,80	0,27	0,95
	b	- 29,58	- 12,26	- 8,07	0,58	- 2,61
	r	0,98	0,99	0,96	0,84	0,99
LA067	a	0,94	0,80	0,58	0,14	0,79
	b	- 46,58	- 27,74	- 11,86	- 0,35	- 5,04
	r	0,93	0,98	0,95	0,75	0,99
LA09	a	0,48	0,31	0,11	2,38	0,32
	b	- 25,37	- 12,51	- 1,49	0,03	- 1,99
	r	0,92	0,90	0,84	0,21	0,95
L3AC	a	1,60	1,21	0,62	0,12	1,29
	b	- 38,23	- 30,75	- 5,05	- 0,03	- 5,20
	r	0,90	0,94	0,91	0,66	0,97
X1	a	0,07	0,09	0,08	0,35	0,12
	b	18,15	11,84	5,60	- 1,07	0,88
	r	0,90	0,90	0,73	0,99	0,86
X10	a	0,04	0,10	0,09	0,16	0,19
	b	54,10	36,40	19,40	19,46	3,47
	r	0,39	0,65	0,49	0,50	0,75

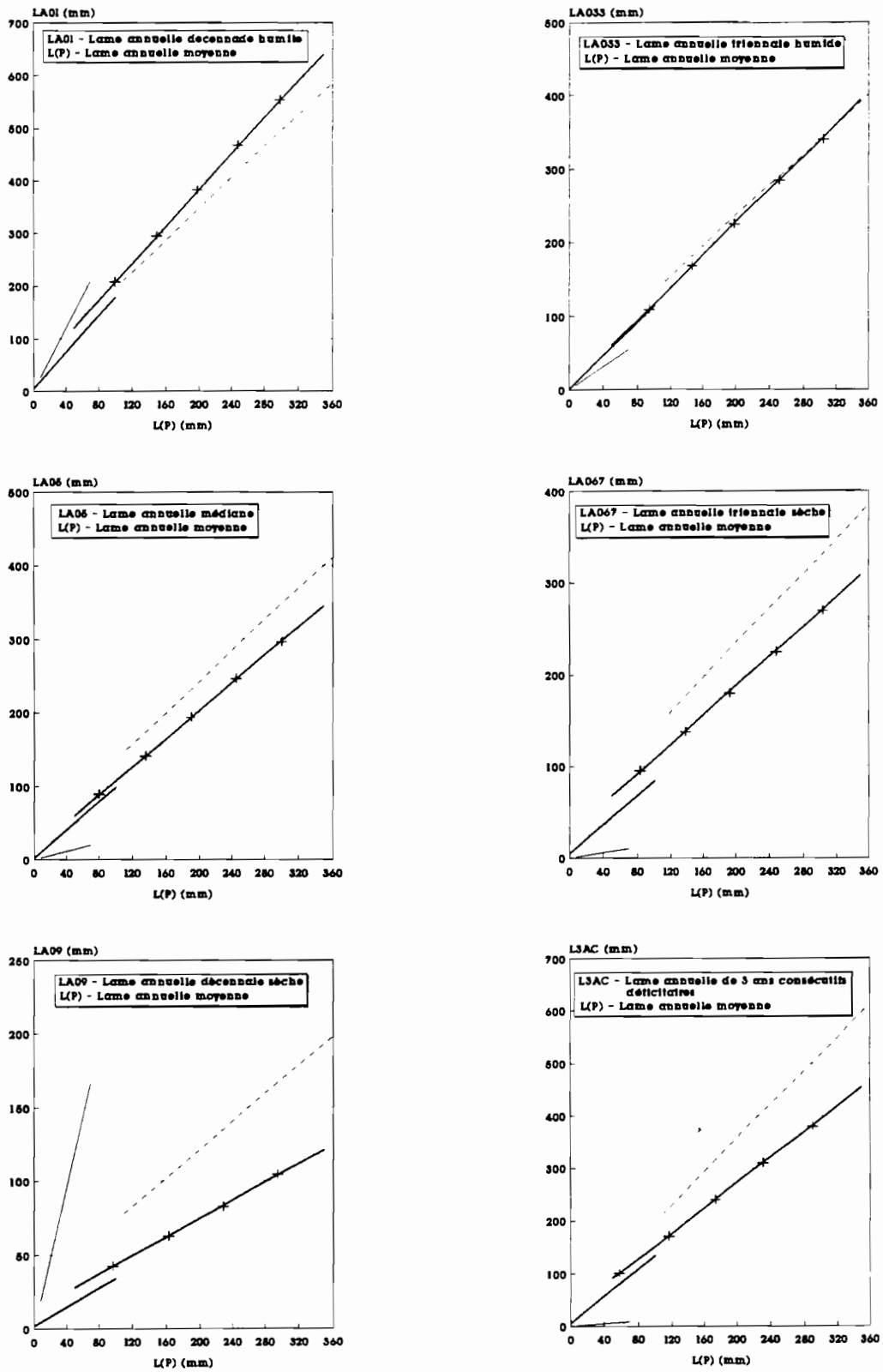
Dans ce tableau :

- a et b sont les coefficients de la droite de régression de la composante avec L(P). Par exemple :

$$LA01 = 1,49 * L(P) + 47,75 \text{ mm pour le groupe de bassins N° 1, etc.}$$

- r est le coefficient de corrélation de la régression.

Pour chaque groupe de bassins, ces régressions ont été établies en utilisant des simulations réalisées avec chacun des pluviomètres sélectionnés, croisés successivement avec chaque bassin du groupe. Ainsi, 6 pluviomètres croisés avec les 3 bassins du groupe 1 correspondent à un total de 18 points pour ce groupe. 6 pluviomètres avec 15 bassins = 90 points pour le groupe 2, etc.



Groupes de bassins:



Figure 4.5.7 "faciès" du régime, en fonction du module, pour les différents groupes de bassins

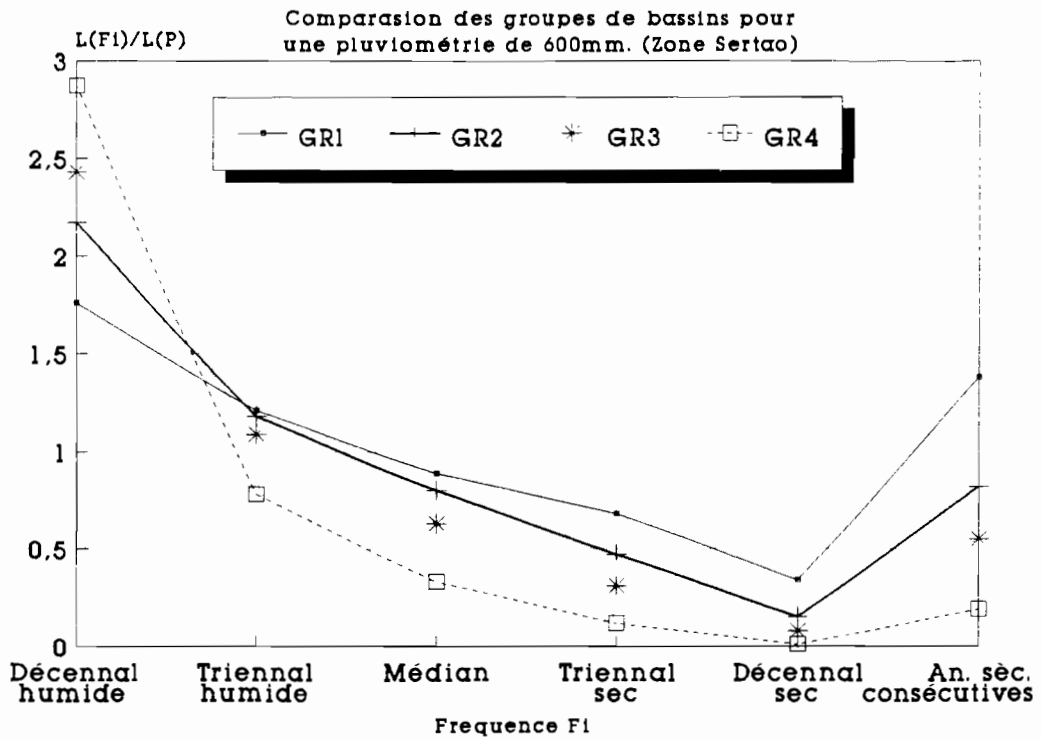


Figure 4.5.8 Evolution du "Facies" du régime selon le groupe de bassin

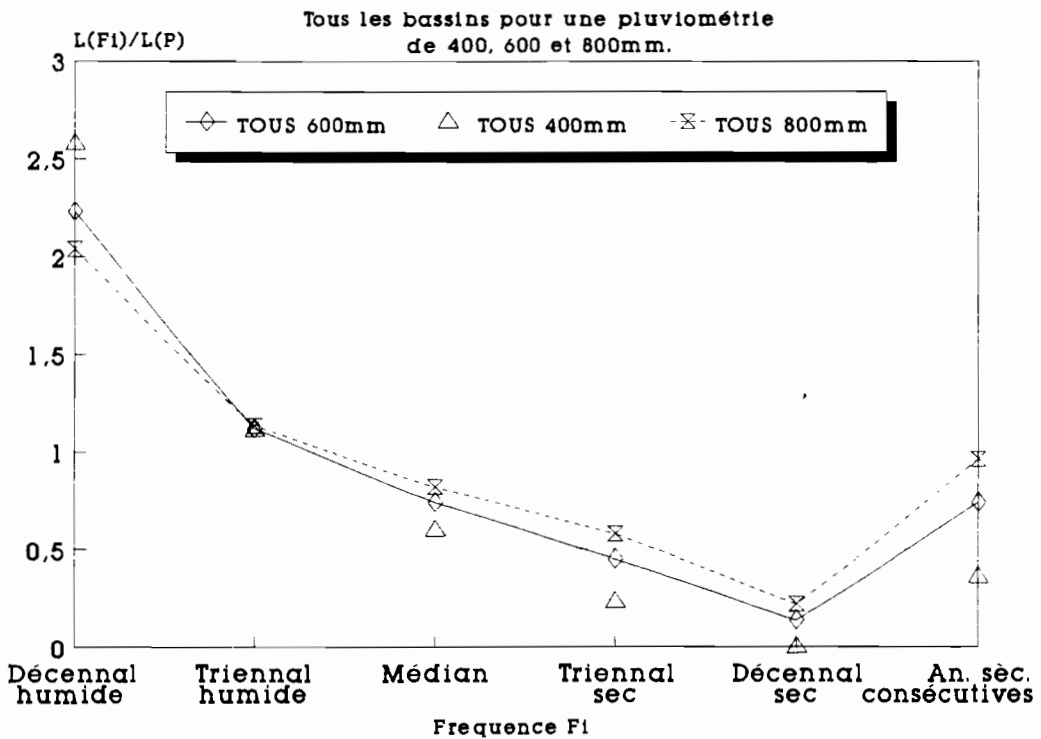


Figure 4.5.9 Evolution du "Facies" du régime selon la pluviométrie annuelle moyenne

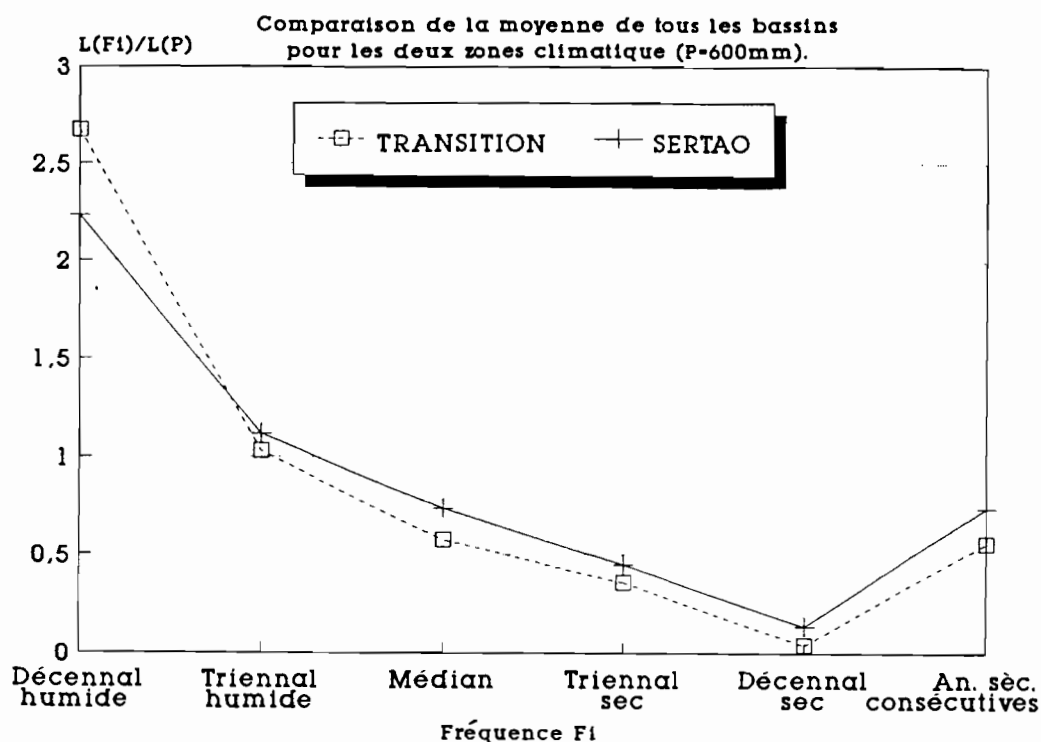


Figure 4.5.10 Evolution du "Facies" du régime selon la "Grande Zone climatique"

La figure 4.5.7 permet d'évaluer, pour chaque composante, la cohérence et la compatibilité entre les équations et les plages de validité proposées pour les divers groupes de bassins.

Nous constatons que les différences entre les différents groupes s'accroissent pour les fréquences qui correspondent aux années les plus sèches, l'irrégularité croissant du groupe 1 au groupe 4.

Les figures 4.5.8 à 4.5.10 permettent le calcul des lames de n'importe quelle fréquence à partir de la lame moyenne. Ces figures montrent que l'irrégularité s'accroît¹⁰ quand on passe du groupe 1 au groupe 4 ou quand la pluviométrie diminue ou quand on passe du Sertão ou à la zone de transition.

Variation des lames des crues en fonction de la pluviométrie (Zone Sertão)

Les coefficients de corrélation entre les crues (X_1 , X_{10}) et les écoulements moyens $L(P)$ sont positifs, mais plus faibles que pour les autres composantes. Les régressions trouvées traduisent une augmentation significative des valeurs de la crue décennale entre les deux bornes de la plage de validité.

Rappelons que les valeurs de X_1 et X_{10} de nos tableaux sont le fruit d'un calcul résultant de l'application des équations d'un modèle à des séries de pluies journalières.

L'étude statistique de la pluviométrie journalière, mentionnée au paragraphe 4.3., n'a pas permis de mettre en évidence une liaison entre les totaux en 24 h de période de retour décennale et les totaux moyens annuels¹¹. Nous sommes donc amenés à penser que cette corrélation positive est essentiellement provoquée par une augmentation de la moyenne de l'indice de saturation préalable IK , avant les fortes crues.

¹⁰ L'irrégularité s'accroît quand les lames décennales humides sont plus fortes et les lames sèches plus faibles.

¹¹ Les totaux pluviométriques en 24 h de la zone climatique 6 sont plus élevés que ceux du reste du Sertão. Cette distribution différente ne paraît pas induire de variations des coefficients X_1 et X_{10} supérieures à 10 %, à l'inverse de ce que nous constatons entre les grandes zones climatiques Sertão et Transition.

Rappelons également que le modèle SUDENE/ORSTOM, que nous utilisons, n'a pas été conçu pour représenter les crues ; son pas de temps est trop élevé. Nous avons simplement tenté d'éviter, au moment du calage, des distorsions trop importantes entre les plus fortes lames en 24 h calculées et observées.

Rappelons enfin que les lames et les débits de pointe des plus fortes crues seront calculées en utilisant une autre méthode. Il faut donc considérer les valeurs de X1 et X10 que nous présentons ici comme des paramètres indicateurs d'un certain "faciès" du régime hydrologique, présentant évidemment une certaine analogie avec les crues, permettant de comparer et d'ordonner les comportements des bassins, mais ne prétendant nullement quantifier les crues annuelles ou décennales.

Les chiffres du tableau 4.5.3 relatifs aux crues et les variations qu'ils impliquent doivent donc être considérés dans cette optique et avec ces restrictions.

Le tableau 4.5.4 suivant fournit les valeurs de X10 pour les grandes zones climatiques du SERTAO, de TRANSITION et la zone N° 6, pour des pluviométries annuelles de 600 et 800 mm.

Tableau 4.5.4 Valeurs de X10 pour diverses zones et pluviométries.

		Moyenne tous bassins	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Zone SERTAO	P = 600 mm	29	62	47	23	22	11
	P = 800 mm	33	64	51	-	31	12
Zone TRANSITION	P = 600 mm	20	46	30	12	5	7
	P = 800 mm	24	54	39	18	14	9
Zone 6	P = 600 mm	33	70	49	26	-	-

Ce tableau 4.5.4. met en évidence :

- une diminution moyenne de 30 % de X10 entre la grande zone climatique de Transition, par rapport à la grande zone climatique du Sertão, qui sert de référence.
- A l'intérieur de cette grande zone Sertão, la zone N° 6 est caractérisée par des valeurs de X10 supérieures de 10 à 15 % à celles des régions voisines.
- Quand la pluviométrie annuelle passe de 600 à 800 mm, X10 augmente de 4 à 20 %.
- Ces différences sont moins importantes pour les bassins des groupes 1 et 2, qui ont des crues les plus élevées.

En conclusion pratique :

- + A l'intérieur d'une même grande zone climatique, les valeurs de X10 des bassins les plus dangereux présenteront des variations relatives inférieures à 10 % quand la pluviométrie annuelle s'accroît (ou diminue) de 200 mm par rapport à la valeur de référence de 600 mm.
- + Les lames des crues dans la zone de Transition seront inférieures de 20 à 30 % à celle du Sertão.

4.5.3. Recherche des facteurs conditionnels des modules

Où l'on montre que le sol et la végétation jouent un rôle prépondérant.

Le module ou la lame écoulée annuelle moyenne peut s'exprimer, nous l'avons vu, en fonction des coefficients L_{600} et A , qui caractérisent le bassin, ainsi que de la pluviométrie P et de la zone climatique.

Il est naturel, comme l'ont fait DUBREUIL *et al* (1975), ainsi que de nombreux auteurs, de chercher les relations existantes entre les modules et les paramètres caractérisant les aspects physiques et morphologiques des bassins versants.

4.5.3.1 Présentation des paramètres physiques étudiés

Le tableau 4.5.4 regroupe les valeurs dont nous disposons pour caractériser le milieu physique des bassins étudiés.

L'information dont nous disposons n'est pas très homogène. Elle est extraite de divers rapports, élaborés avec des techniques et des documents cartographiques hétérogènes. Un même paramètre peut, de plus, ne pas avoir la même pertinence pour un bassin de 100 km² ou une parcelle d'un hectare !

Pour chaque bassin nous disposons des paramètres suivants :

- Le Coefficient (L_{600}) en mm, défini plus haut.
- Le Coefficient (A), défini plus haut.
- La Surface du bassin versant (SUP), en km².
- La Classe de Sol ($CSOL$), classification empirique qui caractérise globalement les sols des 42 bassins, en les rangeant en 5 classes articulées autour des deux classes "pivot" 2 et 5, de la manière suivante :

Classe 2 : Bassins couverts de sols épais, présentant un ruissellement faible à moyen. Presque tous les sous-bassins d'Ibipeba ont été rangés dans cette classe.

Classe 5 : Bassins couverts de sols de 20 à 50 cm d'épaisseur, de perméabilité moyenne (20 à 40 mm/h par la méthode de MUNTZ). Les sous-bassins du bassin de TAUA ont été rangés dans cette classe.

Les *classes 3 et 4* sont composés de bassins dont les sols sont intermédiaires ou sont des juxtapositions des sols de classes 2 et 5.

Classe 3 : Contient les bassins étudiés par le programme GVJ (Missão Velha, Batateiras, Quixabinha, Açude Jardim) couverts en majorité de sols perméables mais dont certaines parties ruissellent beaucoup. Cette classe contient également le micro-bassin N° 4 de TAUA sur vertisols et les açudes MANOEL (MAN) et PEDRO COSTA (PCO).

Classe 4 : Contient les sous-bassins de SUME, dont une partie des sols sont vertiques ou bien sont perméables ; contient également ceux du RIACHO DO NAVIO dont une partie

est composée de régosols perméables et de JUATAMA qui est composé de sols imperméables, associés à des planosols et des podzoliques très perméables.

Classe 6 : Contient le bassin de l'açude JERICO (JER) dont les sols sont imperméables, très peu épais et ne présentent pas de zone capable de retenir l'eau.

Classe 1 : Bassins couverts de sols très épais devant présenter un écoulement nul ou très faible. Seul le sous-bassin LAGOA DO CANTO (LGC) du bassin d'Ibipeba appartient à cette classe.

- La classe de végétation (CVEG) : Elle intègre la protection offerte par la végétation et l'influence de la dégradation de la surface du sol. CVEG varie entre 1 et 7 de la façon suivante :

Classe 1 : Végétation protégeant totalement le sol. Les bassins de trois des açudes de TAUA et des micro-bassins 1 et 2 de SUME, ont été rangés dans cette classe.

Classe 2 : Bassin assez bien conservé, avec quelques zones de mise en culture. Correspond à la majorité des bassins étudiés, quand la végétation naturelle n'est pas trop altérée.

Classe 3 : Les dégradations de la végétation commencent à être importantes ou alors plus de 30 % du bassin est cultivé.

Classe 4 : La végétation n'offre pratiquement plus de protection au sol ni d'obstacle au ruissellement.

Deux autres classes de (CVEG) ont dû être rajoutées, pour tenir compte des dégradations de la surface du sol:

Classe 6 : Dégradations importantes de la surface du sol et formation de croûtes. Les bassins de LUZIMAR et les micro-bassins 3 et 4 de SUME (deuxième phase) ont été rangés dans cette classe.

Classe 7 : Dégradation encore plus avancée de la surface du sol, décapage des premiers horizons. Les micro-bassins 3 et 4 de SUME (troisième phase) ont été rangés dans cette classe.

Les classes de sol (CSOL) et la végétation (CVEG) sont des variables discrètes. Cependant les codes de ces variables ont été choisis pour que l'on puisse également la considérer, en première approximation, comme une variable continue. Cette approche n'est pas très orthodoxe sur le plan statistique, mais elle nous permettra d'utiliser des méthodes habituellement réservées aux variables continues, telle que les corrélations.

Tableau 4.5.4 Paramètres physiques et morphologiques des bassins étudiés.

SIGLE	L ₆₀₀	A	SUP	CSOL	CVEG	ACUD	COMP	Ds	ALT	DREN	GRBAC
PIR	42.3	0.02545	194.0	5.	2.	.50	1.41	25	490.	2.13	3.
MNO	67.6	0.02564	19.0	5.	2.	.30	1.28	14	520.	1.07	2.
MOQ	82.4	0.03224	7.76	5.	2.	.00	1.26	30	506.		2.
JOF	66.8	0.03119	4.59	5.	2.	.00	1.20	30	500.		2.
ACD	64.2	0.03099	0.83	5.	1.	.00	1.20	30	500.		2.
CAL	82.5	0.02768	0.77	5.	2.	.00	1.30	30	510.	4.23	2.
LUZ	170.1	0.02279	0.16	5.	6.	.00	1.70	30	500.		1.
CHI	61.2	0.02694	0.92	5.	2.	.00	1.30	30	500.		2.
JUZ	51.9	0.02681	0.35	5.	1.	.00	1.50	30	500.		5.
NAS	78.9	0.02793	1.71	5.	1.	.00	1.20	30	500.		2.
M1T	89.9	0.02282	0.01	5.	4.	.00	1.40	30	500.		2.
M2T	79.4	0.02227	0.014	5.	4.	.00	1.40	30	500.		2.
M3T	95.5	0.02614	0.009	5.	3.	.00	1.40	30	500.		2.
M4T	33.0	0.03251	0.011	3.	2.	.00	1.40	30	500.		3.
GA2	31.4	0.03297	137.40	4.	2.	.30	1.66	46	592.	2.30	3.
JA2	36.9	0.03689	26.80	4.	3.	.10	1.54	26	651.	1.28	3.
UM1	28.0	0.02607	10.70	4.	2.	.10	1.55	48	588.	1.86	3.
UM2	43.5	0.02908	10.70	4.	2.	.10	1.55	48	588.	1.86	3.
MS1	6.7	0.02811	0.006	4.	1.	.00	1.40	50	600.		4.
MS2	12.7	0.03884	0.011	4.	1.	.00	1.40	50	600.		4.
S31	66.0	0.02511	0.005	4.	3.	.00	1.40	50	600.		2.
S32	114.2	0.02209	0.005	4.	6.	.00	1.40	50	600.		2.
S33	195.1	0.01691	0.005	4.	7.	.00	1.40	50	600.		1.
S41	66.0	0.02800	0.005	4.	3.	.00	1.40	50	600.		2.
S42	79.8	0.02317	0.005	4.	6.	.00	1.40	50	600.		2.
S43	162.9	0.02039	0.005	4.	7.	.00	1.40	50	600.		1.
MAT	34.7	0.04264	468.0	4.	2.	.25	1.17	200	528.	1.40	3.
OSB	30.7	0.05273	45.20	4.	2.	.00	1.23	125	580.	1.40	4.
SAL	47.2	0.03511	15.60	4.	2.	.00	1.28	110	604.	1.70	3.
JU1	67.8	0.03555	19.20	4.	2.	.20	1.19	142	250.	5.40	3.
JU2	48.6	0.04135	19.20	4.	2.	.30	1.19	142	250.	5.40	3.
LAG	1.3	0.03146	321.50	2.	3.	.50	1.58	172	750.	0.57	5.
LBA	18.4	0.02913	19.10	2.	2.	.00	1.23	160	930.	0.48	5.
FZI	8.0	0.02439	46.80	2.	3.	.00	1.41	70	710.	0.94	5.
FZP	13.9	0.02486	14.80	2.	3.	.00	1.31	53	730.	0.69	5.
BAT	39.0	0.02945	203.20	3.	2.	.00	1.20	412	584.		5.
MVE	14.0	0.02414	323.50	3.	2.	.00	1.17	423	596.		5.
AJA	75.3	0.02749	49.0	3.	2.	.00	1.40	300	700.		5.
QUI	41.2	0.02689	85.60	3.	2.	.00	1.24	144	515.		3.
MAN	30.1	0.03305	2.35	3.	3.	.00	1.20	150	280.		3.
JER	153.4	0.02892	0.41	6.	2.	.00	1.20	40	260.		2.
PCO	31.2	0.01900	0.09	3.	3.	.00	1.40	100	500.		5.
LGC	0.0	??	61.30	1	3	.00	1,16	36	785.	0.07	?
ACU1	?	?	48.50	?	?	.10	1.31	47	82.	1.22	?
ACU2	?	?	18.50	?	?	.00	1.12	40	105.	0.46	?
ACU3	?	?	8.80	?	?	.00	1.04		88.	1.32	?
ACU4	?	?	178.80	?	?	.20	1.41	52	87.	0.91	?

(*) Le bassin de Lagoa do Canto à IBIBEBA n'a jamais coulé.

- La proportion du bassin contrôlée par des açudes (ACUD).
- L'altitude moyenne du bassin (ALT) en m.
- La dénivelée spécifique du bassin, (Ds), exprimée en mètres, selon la formule proposée par DUBREUIL et GUISCAFRE (1971), déjà présentée au paragraphe 2.3.1.2. Selon ces auteurs, (Ds) permet de comparer directement le relief de bassins de taille différente sur une gamme de surface s'étalant entre 7 et 500 km². Dans le cas de petits bassins de surface inférieure à 7 km², pour lesquels la formule n'est plus valable, nous avons donc adopté une valeur de Ds mesurée sur des bassins voisins, plus grands et de relief similaire.
- L'indice de compacité du bassin (COMP) calculée avec la formule de Gravelius $COMP = 0,282 P \times SUP^{-0,5}$ où SUP est la surface du bassin et P son périmètre.

- La densité de drainage (**DREN**), exprimée en km de thalweg par km² de bassin (km/km²). La densité de drainage n'a pas pu être calculée pour tous les bassins. De plus l'échelle et la précision des documents cartographiques ou photographiques utilisés varient d'un bassin à l'autre.
- Le groupe du bassin (**GRBAC**) varie entre 1 et 5 et a été défini lors de l'étude typologique des bassins présentée précédemment.

4.5.3.2 Corrélations entre les paramètres physiques, morphologiques et des modèles

■ Présentation des corrélations

On a systématiquement calculé les coefficients de corrélation entre, d'une part chacun des paramètres physiques et morphologiques du tableau 4.5.6, d'autre part les paramètres principaux des ajustements, qui ont été présentés dans le chapitre 4.2 et le tableau 4.2.5.

Ce tableau 4.5.7 réunit trois ensembles de coefficients de corrélation :

- a) **Ensemble complet des 42 bassins** : les coefficients sont calculés avec l'échantillon complet des 42 bassins disponibles (1^{ère} ligne du tableau 4.5.5).
- b) **Ensemble des 16 grands bassins** : les coefficients sont calculés avec l'échantillon des 16 bassins pour lesquels la densité de drainage DREN a été déterminée. Les petits bassins comme les micro-bassins expérimentaux, et ceux des petits açudes ou les bassins plus grands étudiés par le programme GVJ (sauf JUATAMA) ne font pas partie de cet ensemble. Pour ce groupe réduit de 16 bassins, on peut considérer que les paramètres physiques et morphologiques ont été déterminés de manière relativement homogène (2^{ème} ligne du tableau 4.5.5).
- c) **Ensemble des 32 bassins dont les CI sont comparables** : les coefficients sont calculés avec l'échantillon des 32 bassins dont le CI est compris entre 0,94 et 0,96. Ce troisième échantillon permet d'analyser les relations existantes entre, d'une part les paramètres des modèles CI, IKX, IKN, IK1 et IK3 et d'autre part tous les autres paramètres en se basant sur un échantillon homogène (3^{ème} ligne du tableau 4.5.5).

■ Analyse des corrélations

Notons, tout d'abord, la **faiblesse générale des corrélations**: près de la moitié des coefficients ont une valeur absolue inférieure à 0,25 ; un quart, à peine, sont supérieurs à 0,50 et une infime minorité passe le cap des 0,75 et cela malgré l'existence de relations quasi " fonctionnelles" entre certains paramètres des modèles, comme celles qui existent entre D1 et D3, entre IKX et IK1 ou entre IKN et IK3. La faiblesse de ces corrélations montre que le fonctionnement des bassins est complexe et possède un grand nombre de degrés de liberté. Il ne pourra donc pas être réduit ou expliqué par un trop petit nombre de paramètres sans perdre, inévitablement, une partie de la richesse de son information et de sa diversité. La faiblesse de ces corrélations limitera la portée des analyses des liaisons entre les divers paramètres que nous allons entreprendre.

Tableau 4.5.5 Coefficients de corrélation entre paramètres physiques, morphologiques et des modèles.

A	SUP	CSOL	CVEG	ACUD	COMP	Ds	ALT	DREN	CI	IKX	IKN	IK1	X01	D1	IK3	X03	D3	
-0.43	-0.35	.55	.66	-0.25	.09	-0.30	-0.28	-	.16	-0.54	-0.15	-0.59	-0.08	.64	-0.27	-0.49	.59	L ₆₀₀ (42 b) (16 bassins) (32 bassins) etc
.06	-0.31	.83	-0.61	-0.01	-0.36	-0.29	-0.69	.68	.18	.19	.12	.17	.24	.69	.25	-0.51	.58	
1.00	.24	-0.02	-0.52	.24	-0.30	.16	-0.17	-	.36	.60	.46	.58	-0.08	-0.19	.40	.33	-0.30	A
1.00	.22	.17	-0.24	-0.04	-0.37	.56	-0.31	.21	.71	.76	.59	.81	-0.05	-0.10	.52	-0.17	-0.06	
									.45	.50	.31	.47			.31			
	1.00	-0.29	-0.16	.55	-0.06	.59	.08	-	-0.19	.25	-0.23	.27	-0.27	-0.53	-0.15	.24	-0.38	SUP
	1.00	-0.08	.08	.59	.05	.50	.06	-0.24	-0.15	-0.20	-0.34	-0.14	-0.59	-0.41	-0.42	.48	-0.39	
									.41	.43	-0.21	.42			-0.04			
		1.00	-0.03	-0.04	-0.02	-0.52	-0.55	-	.16	-0.31	.03	-0.28	.11	.67	-0.02	-0.16	.41	CSOL
		1.00	-0.66	.22	-0.09	-0.41	-0.66	.48	.13	.28	.09	.35	.07	.74	.20	-0.34	.66	
									.01	-0.60	-0.00	-0.59			-0.19			
			1.00	-0.15	.34	-0.16	.12	-	-0.02	-0.46	-0.25	-0.47	-0.21	.33	-0.35	-0.34	.55	CVEG
			1.00	-0.05	.34	-0.08	.46	-0.44	-0.50	-0.55	-0.48	-0.49	-0.42	-0.58	-0.57	.36	-0.53	
									-0.09	-0.49	-0.26	-0.50			-0.38			
				1.00	.22	.02	-0.08	-	-0.51	.15	-0.04	.14	-0.33	-0.28	-0.14	.43	-0.08	ACUD
				1.00	.24	.10	-0.32	.12	-0.44	-0.14	-0.18	-0.07	-0.43	-0.07	-0.25	.59	-0.05	
									.49	.51	.29	.42			.15			
					1.00	-0.33	.40	-	-0.27	-0.20	-0.13	-0.21	-0.01	.10	-0.21	.11	.19	COMP
					1.00	-0.47	.33	-0.31	-0.37	-0.21	-0.29	-0.15	-0.01	.00	-0.35	.27	-0.06	
									-0.38	-0.13	-0.09	-0.17			-0.11			
						1.00	.18	-	.16	.52	-0.01	.48	-0.13	-0.59	.16	-0.12	-0.40	Ds
						1.00	-0.00	.06	.45	.29	.37	.22	-0.03	-0.53	.25	.17	-0.44	
									.19	.58	-0.10	.53			.13			
							1.00	-	-0.13	.03	-0.22	-0.02	.08	-0.31	-0.08	.24	-0.16	ALT
							1.00	-0.86	-0.10	-0.32	-0.39	-0.39	.17	-0.54	-0.28	.22	-0.53	
									-0.35	.01	-0.34	.02			-0.09			
								1.00	.24	.31	.47	.27	.10	.42	.37	-0.39	.33	DREN
									.34	.74	.81	.68			.72			
									1.00	.38	.43	.30	.30	.12	.47	-0.40	.03	CI
									1.00	.83	.65	.73	.54	.03	.75	-0.64	.02	
									1.00	.12	.13	.10	-0.19	-0.28	.09	.05	-0.21	
										1.00	.51	.96	.04	-0.40	.66	.08	-0.20	IKX
										1.00	.76	.96	.38	.17	.78	-0.46	.20	
										1.00	.36	.97	-0.05	-0.59	.59	.19	-0.35	
											1.00	.49	.26	.15	.80	-0.04	.21	IKN
											1.00	.75	.46	.26	.87	-0.20	.32	
											1.00	.35	.21	.16	.79	.07	.23	
												1.00	.03	-0.36	.67	.14	-0.19	IK1
												1.00	.23	.26	.73	-0.34	.31	
												1.00	-0.02	-0.55	.63	.24	-0.37	
													1.00	.13	.37	-0.05	.00	X01
													1.00	.25	.64	-0.43	.22	
															.28			
														1.00	.07	-0.10	.72	D1
														1.00	.30	-0.28	.95	
															-0.01			
															1.00	-0.01	.08	IK3
															1.00	-0.36	.31	
															1.00	.21	.00	
																1.00	-0.20	X03
																1.00	-0.21	

■ Définition des types de liaisons entre paramètres.

Définissons, tout d'abord, trois types de liaisons :

a) **Liaisons** (qui semblent) **logiques** ou qui correspondent à des idées généralement admises. Par exemple:

- La lame écoulée (L_{600}) diminue avec la surface (SUP).
- La lame écoulée augmente avec (D1), (D3).
- Le nombre d'açudes et donc le coefficient (ACUD) augmente avec la surface, etc...

b) Liaisons qui semblent **paradoxales** (ou encore **illogiques**), qui semblent contraires aux idées reçues ou à un raisonnement simple. Donnons un exemple: le relief (Ds) est corrélé **négativement** avec l'écoulement, contrairement à ce qu'on attendrait de ce coefficient!

c) Les liaisons jugées **non significatives** ou **fortuites**: elles ne sont pas significatives sur le plan statistique, ou bien l'on constate qu'elles sont **biaisées** par certaines caractéristiques particulières de l'échantillon de bassins¹² étudiés. Ainsi, par exemple, tous les bassins sur formation sédimentaire sont situés à des altitudes plus élevées que les autres. Il ne faut pas, pour autant, en déduire trop rapidement quelque propriété miraculeuse de l'altitude...

■ Analyse systématique des corrélations

* Analyse des liaisons de la lame écoulée (L_{600}) :

- Liaisons logiques: CSOL, SUP (liaison négative), DREN, D1, D2, X03, ACUD (liaison très faible).
- Liaisons paradoxales : le relief Ds est relié **négativement** avec l'écoulement. Ce paradoxe semble provoqué par le fait que les bassins de plus fort relief (GVJ et RIACHO DO NAVIO) ont des écoulements assez faibles, pour des raisons liées surtout à la perméabilité de leurs sols.
- La liaison avec CVEG est logique et significative pour l'échantillon de 42 bassins, mais devient paradoxale avec l'échantillon de 16 grands bassins. Dans le cas des grands bassins, ceux qui ont un CVEG élevé sont justement ceux qui ont été choisis par les cultivateurs pour leurs **sois épais**. Ces bassins ne coulent donc que très peu. C'est le cas du bassin de JATOBA à SUME et des bassins d'IBIPEBA. Alors que dans le cas des petits bassins et des parcelles, les CVEG élevés correspondent à des zones défrichées qui coulent beaucoup plus.
- Liaisons peu significatives : COMP, ALT, CI et les autres paramètres.

* Analyse des liaisons du coefficient (A) :

- A est lié **positivement** avec CI, IKX, IKN, IK1 et IK2, et **négativement** avec CVEG. Les autres liaisons semblent peu significatives ou fortuites.

¹² Le choix des bassins que nous étudions est le fruit d'une planification... Nous nous trouvons donc dans des conditions que désapprouverait tout statisticien qui recommanderait, bien au contraire, d'obtenir un échantillon par tirage au sort parmi l'ensemble des bassins du Nordeste.

*** Analyse des liaisons de la surface (SUP) :**

- SUP est lié de manière logique, mais faible à L_{600} et DREN (liaisons négatives de - 0,25 à - 0,35), ainsi qu'à ACUD (liaison positive).
- Les liaisons avec Ds et ALT semblent, comme nous l'avons expliqué, fortuites ou biaisées par l'échantillon de bassins.

*** Analyse des liaisons de la classe de sol (CSOL) :**

- CSOL est fortement corrélé de manière logique avec L_{600} , DREN, D1 et D3.
- Les corrélations avec Ds et ALT semblent illogiques ou fortuites et les autres sont dépourvues de signification.

*** Analyse des liaisons de la classe de végétation (CVEG) :**

- Comme nous l'avons signalé les liaisons du paramètre CVEG s'inversent, quand on passe de l'échantillon des 16 grands bassins à celui des 42. Les sols cultivés sont, en effet, plus épais dans l'échantillon des 16 bassins, ce qui n'est plus vrai dans l'échantillon total.
- CVEG est faiblement lié, de manière négative à X01, ce qui signifierait que l'absence de végétation diminue la précipitation limite à l'écoulement des bassins saturés. CVEG semble lié de manière négative avec A.

*** Analyse des liaisons du paramètre (ACUD) :**

- Liaisons logiques mais assez faibles avec L_{600} , SUP et X03 (les açudes diminueraient le ruissellement des crues survenant en début de saison des pluies).
- Les autres liaisons semblent peu significatives, mis à part la liaison avec CI qui est biaisée par le fait que les CI des grands bassins, qui ont le plus d'açudes, sont, plus souvent que les autres, inférieurs à 0,95 pour des raisons historiques dues à l'évolution des techniques de calage.

*** Analyse des liaisons des paramètres (COMP), (Ds) et (ALT) :**

- Les liaisons de Ds avec la plupart des autres paramètres sont paradoxales.
- Liaisons faibles entre COMP et Ds et entre ALT et Ds.
- Les autres liaisons semblent dépourvues de signification, fortuites ou même paradoxales. Ceci s'explique surtout par l'échantillon biaisé par les grands bassins du GVJ, qui ont une altitude et un relief élevé, alors que leurs coefficients L_{600} sont faibles.

*** Analyse des liaisons du paramètre (DREN) :**

- Liaison logique et élevée avec L_{600} et CSOL, moins forte avec D1 et D3.
- Liaison paradoxale avec CVEG et surtout avec ALT, pour des raisons déjà exposées.

*** Analyse des liaisons des paramètres (CI), (IKX), (IKN), (IK1) et (IK2) :**

- Ces paramètres qui impliquent l'indice des précipitations antérieures IK sont fortement liés entre eux, ce qui est normal, si l'on considère la manière dont ces paramètres ont été introduits dans les modèles. Ainsi les liaisons entre IKX et IK1 d'une part et IKN et IK3 sont très fortes.
- Ces paramètres sont tous liés de manière positive au coefficient A.
- Ces paramètres sont liés de manière logique aux paramètres physiques comme CSOL, CVEG, ACUD et DREN.
- Les liaisons sont peu significatives, voire paradoxales avec COMP, Ds, ALT.

*** Analyse des liaisons des paramètres (X01) et (X03) :**

- Les liaisons du paramètre X01 avec l'ensemble des autres paramètres sont faibles et semblent dépourvues de signification. L'inconsistance de ces relations et la liaison négative et paradoxale avec le paramètre ACUD pourraient s'expliquer par le fait que, pour les fortes valeurs de l'indice pluviométrique IK, comprises entre IKX et IK1 (qui correspondent à une extrapolation au dessus de la première hyperbole du modèle), l'effet des paramètres du modèle "s'inversent".
- Les liaisons du paramètre X03 sont plus fortes et en général cohérentes et logiques.
- La liaison entre X01 et X03 est très faible.

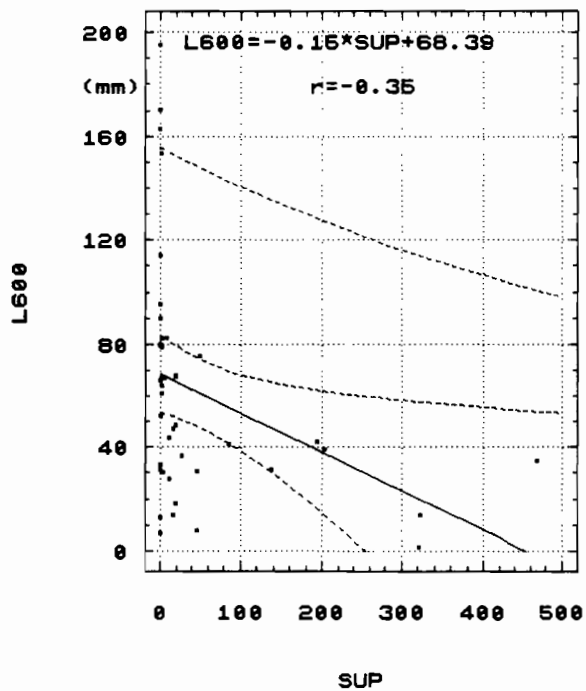
Analyse des liaisons des paramètres (D1) et (D3) :

- Forte liaison logique entre D1 et D3.
- D1 et D3 sont corrélés de manière logique et relativement forte avec L_{600} , CSOL et de manière logique mais négative avec SUP.
- La liaison avec les autres paramètres est plus lâche, voire paradoxale dans le cas de Ds, cas déjà commenté.

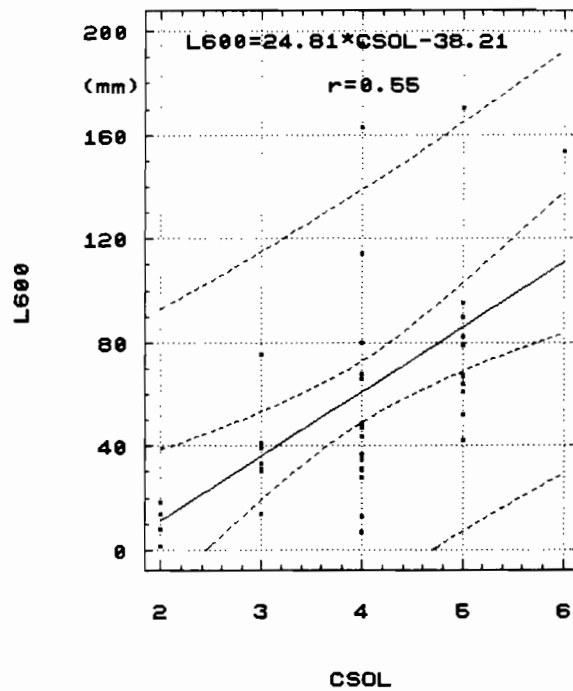
En résumé :

- Les coefficients de corrélation sont généralement faibles et dépassent rarement 0,50. Ceci reflète la complexité des interactions et l'hétérogénéité de l'échantillon que nous analysons.
- L_{600} , paramètre que nous cherchons à expliquer, est lié à CSOL, D1, D2, X03 et ACUD et opposé à SUP.
- Les liaisons trouvées pour A semblent dépourvues de signification statistique ou physique.
- Le relief D_s présente des liaisons paradoxales avec la plupart des autres paramètres.

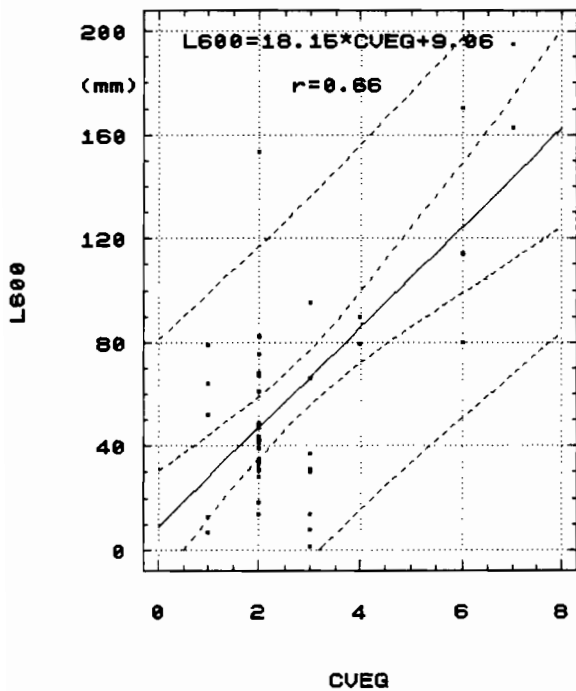
Regression entre L600 et SUP



Regression entre L600 et CSOL



Regression entre L600 et CUEG



Regression entre L600 et Ds

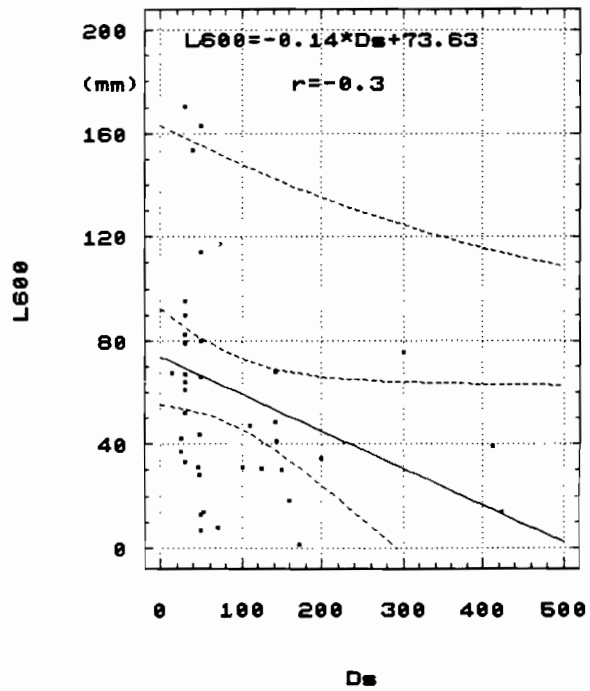
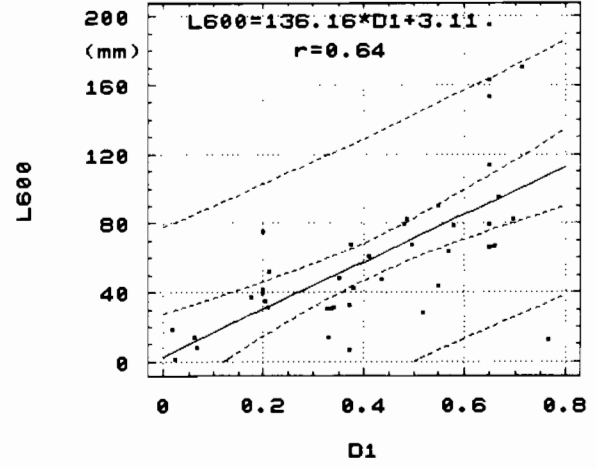
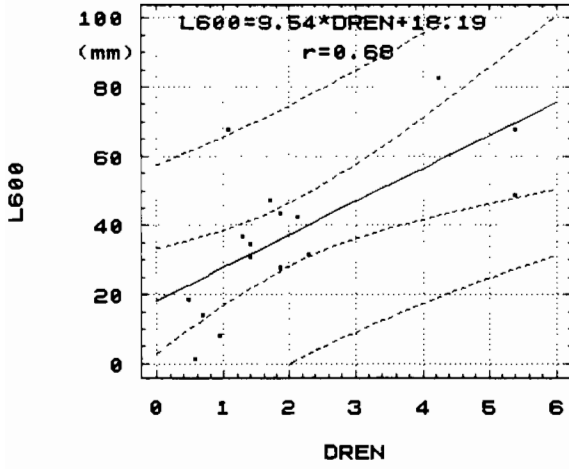


Figure 4.5.11A Corrélation entre paramètres caractéristiques des bassins.

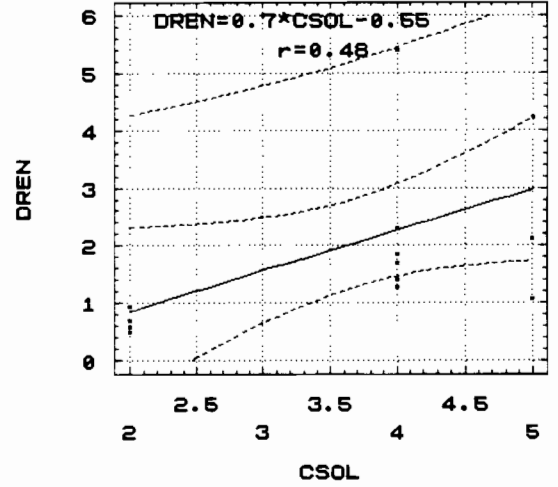
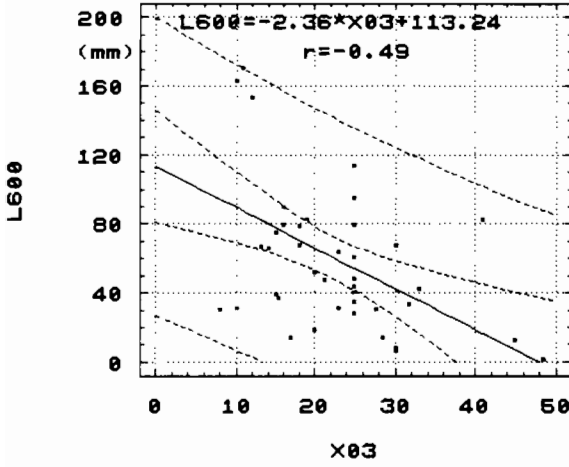
Regression entre L600 et DREN

Regression entre L600 et D1



Regression entre L600 et X03

Regression entre DREN et CSOL



Regression entre IK3 et CI

Regression entre D1 et D3

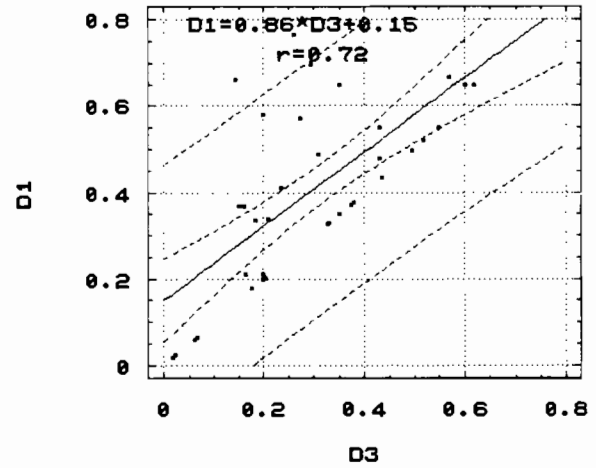
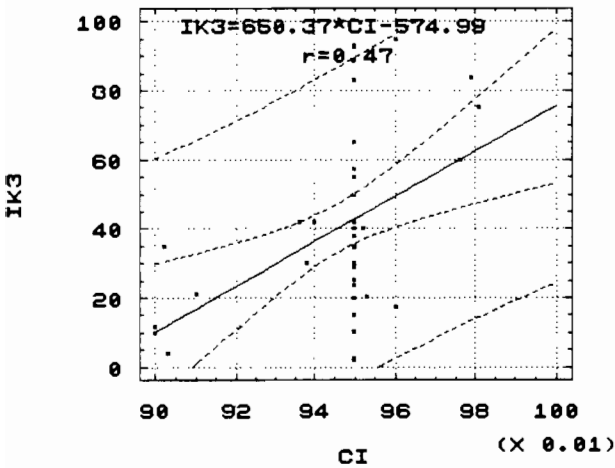


Figure 4.5.11B Corrélation entre paramètres caractéristiques des bassins.

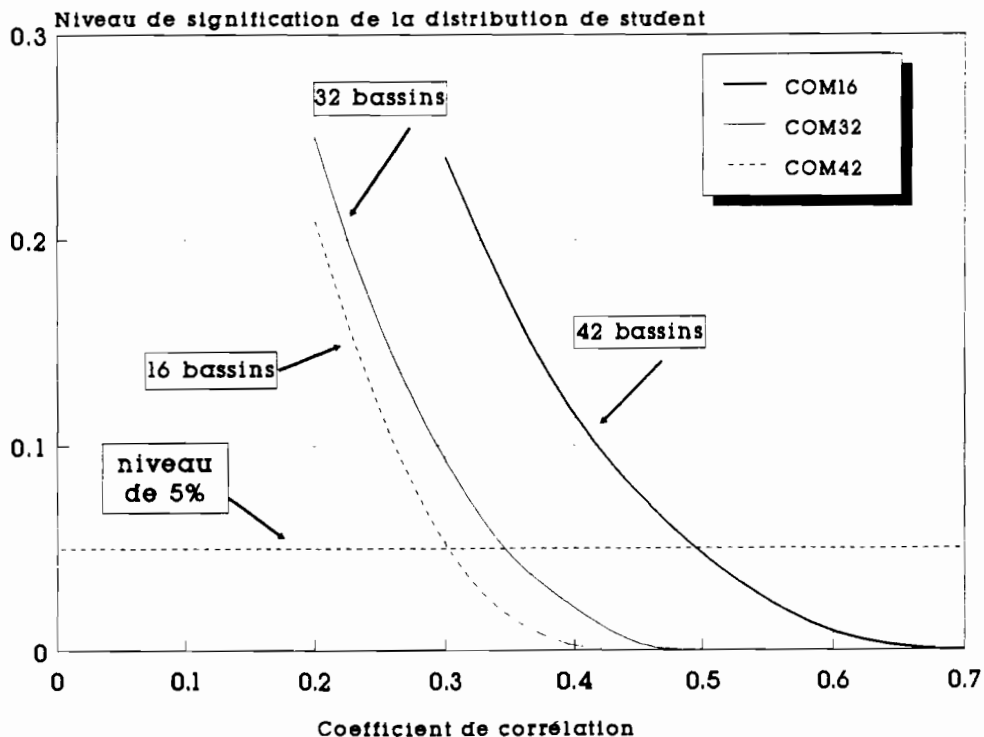


Figure 4.5.11C Niveau de signification des coefficients de corrélation

4.5.3.3 Analyse en composantes principales du rôle des différents paramètres

L'analyse en composantes principales confirme, heureusement, les grandes lignes de l'analyse précédente:

- Les relations entre les divers paramètres physiques, morphologiques et des modèles sont complexes. On ne pourra pas aller très loin dans leur simplification, sans subir une perte importante d'information. Les deux premières composantes expliquent moins de 50 % de la variance ou de l'inertie totale du système.
- La première composante, qui explique 33 % de la variance, peut être représenté par la variable L_{600} , qui est justement celle que nous cherchons à expliquer en premier lieu.
- L'agencement des paramètres et des bassins, par rapport à ce premier axe, confirme les liaisons mises en évidence lors de l'étude précédente des corrélations: L_{600} , D1, D3, CVEG et CSOL composent ce premier axe et s'y opposent à SUP et à ACUD.
- A est très proche de la deuxième composante, qui explique encore 15 % de la variance. A et CSOL composent ce deuxième axe. Il s'y opposent à ALT, COMP et CVEG.
- Les associations et les regroupements suivant les composantes 3 et 4, qui expliquent chacune environ 13 % de la variance, sont moins évidents. Nous n'en n'avons pas trouvé d'explication physique simple.

- Les 8 derniers axes expliquent encore 25 % de la variance, sans qu'aucun d'entre eux ne dépasse 6 %.

Les regroupements de bassins dans le plan des deux premières composantes sont heureusement semblables à ceux que nous avons trouvés lors de l'étude typologique des bassins: S33, S43, LUZ, S32 et S42 sont regroupés, FZI, LBA, RLG aussi, etc.

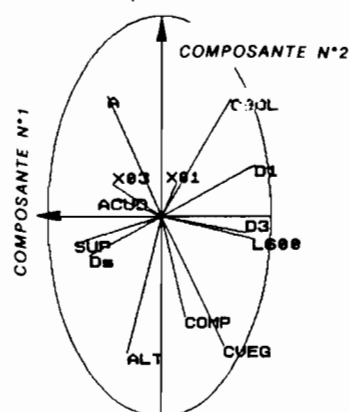
Figure 4.5.12 Analyse en composantes principales du rôle des différents paramètres

a) Analyse des composantes

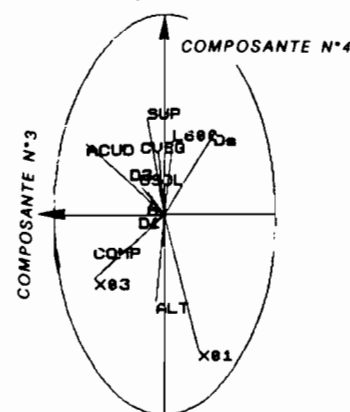
Pourcentage de la variance expliquée par chaque composante

Composante No	Pourcentage de la Variance	Pourcentage accumulé
1	33.14325	33.14325
2	15.61110	48.75435
3	13.37674	62.13109
4	12.27942	74.41051

Plot of Simple Correlations



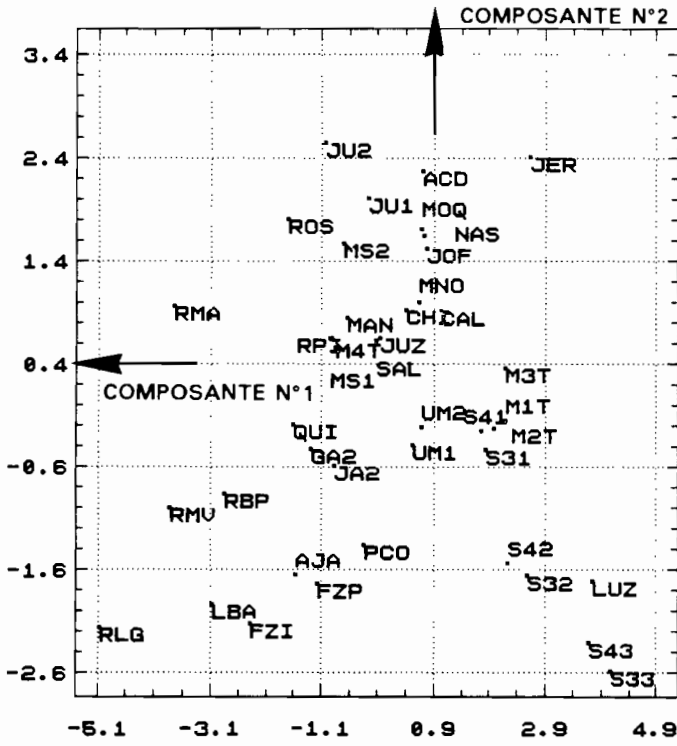
Plot of Simple Correlations



Coordonnées des quatre premières composantes

	1 ^{ère} composante	2 ^{ème} composante	3 ^{ème} composante	4 ^{ème} composante
L600	0.83251	-0.11194	0.07580	0.36413
A	-0.47457	0.59920	-0.12028	0.04539
SUP	-0.67591	-0.12010	-0.16981	0.47572
CSOL	0.63960	0.58116	-0.15792	0.11269
CVEG	0.57540	-0.64680	-0.06224	0.30383
ACUD	-0.38577	0.08760	-0.72019	0.35160
COMP	0.21392	-0.50140	-0.57143	-0.27770
Ds	-0.62826	-0.19822	0.46352	0.39651
ALT	-0.30428	-0.68247	-0.08169	-0.43604
X01	0.12710	0.16411	0.31740	-0.67851
D1	0.85079	0.25321	-0.16375	-0.05648
X03	-0.42638	0.15989	-0.64860	-0.31696
D3	0.76787	-0.08129	-0.21481	0.13501

Plot of Principal Components



Plot of Principal Components

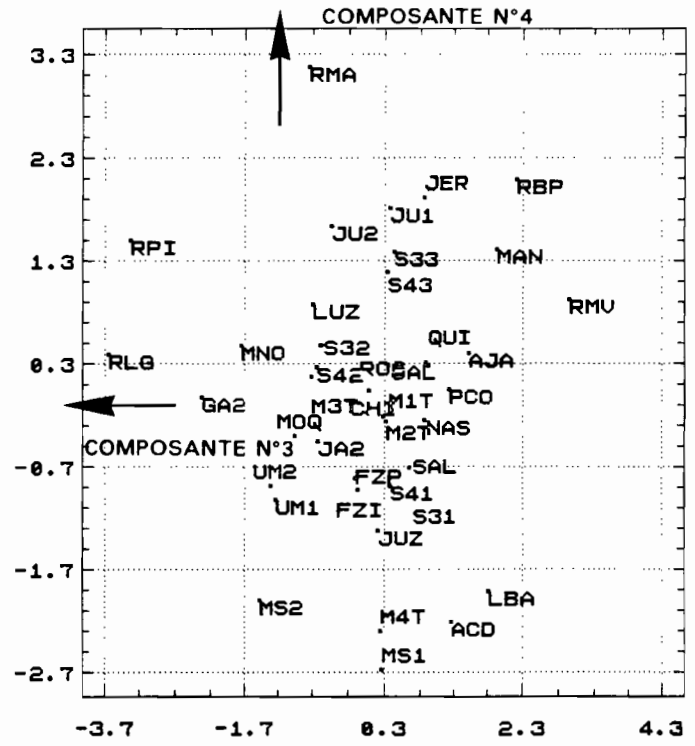


Figure 4.5.12 Analyse en composantes principales du rôle des différents paramètres
 b) Regroupement de bassins

4.5.3.4 Calcul de L_{600} par la méthode du Stepwise

Explications du L_{600} pour les paramètres physiques ou morphologiques du bassin

La méthode du STEPWISE proposée, par STATGRAPHICS permet d'ajuster un modèle linéaire qui est, en fait, une équation permettant l'estimation de la variable dépendante (L_{600}) à partir d'un ou plusieurs paramètres physiques et morphologiques.

La méthode statistique du stepwise identifie rapidement et sans ambiguïté les facteurs CSOL et CVEG comme étant ceux qui diminuent le plus rapidement la variance de la relation. Ils expliquent, à eux seul, plus de 74 % de cette variance.

L'équation proposée est

$$L_{600} = 26,9 \text{ CSOL} + 19,7 \text{ CVEG} - 95 \text{ mm} \quad (4)$$

La figure 4.5.13 permet de comparer la cohérence des L_{600} initiales avec celles calculées par le modèle.

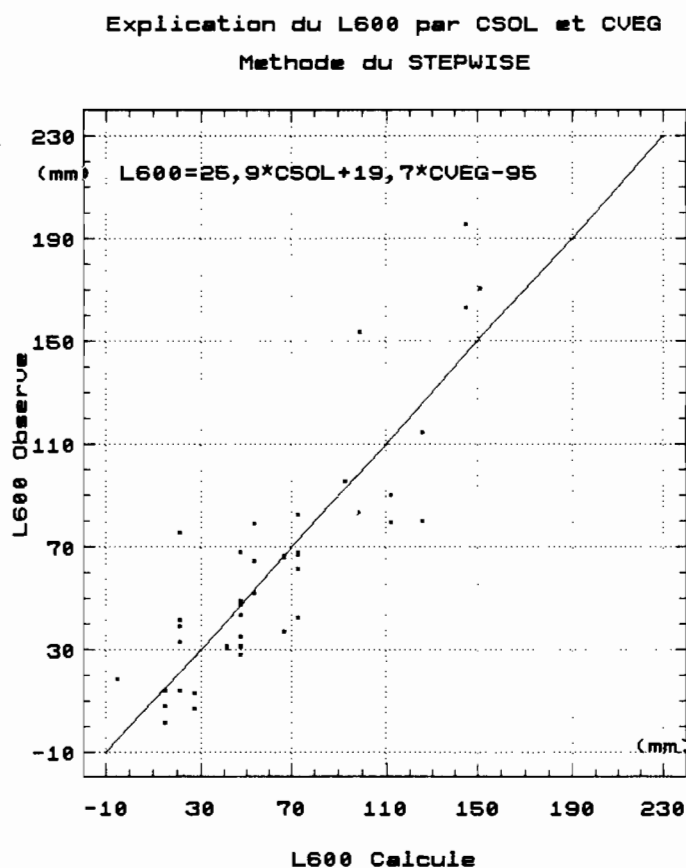
Figure 4.5.13 Calcul de L_{600} par la méthode du Stepwise (paramètre physique du bassin)

Sélection des paramètres par la méthode du Stepwise

Variable	Corrélation	Variance expliquée
1. SUP	.3480	5.5116
2. CSOL	.5460	16.9909
3. CVEG	.6616	31.1401
4. ACUD	.2540	2.7583
5. COMP	.0875	.3089
6. Ds	.3039	4.0687
7. ALT	.2793	3.3837

Variabes sélectionnées	Coeff.	Variance expliquée
2. CSOL	25.7973	52.2346
3. CVEG	19.6766	74.8855

$$r^2 = 0,76$$



Nous avons essayé d'utiliser la même méthode pour expliquer L_{600} à partir des trois paramètres COMP, Ds et ALT. La relation trouvée est beaucoup plus mauvaise, puisqu'elle ne supprime que 13 % de la variance. Ceci prouve très nettement, *par l'absurde*, l'importance du rôle joué par les facteurs CSOL et CVEG.

Explication du L_{600} par les paramètres du modèle

Nous avons utilisé la même méthode pour estimer, toujours L_{600} , mais, cette fois, à partir des paramètres du modèle.

Le modèle trouvé est le suivant :

$$L_{600} = -0,27 IK1 + 99,7 D1 - 1,9 X03 + 108$$

Ce modèle explique 71 % de la variance de L_{600} . La figure 4.5.14 rend compte de la pertinence de ce modèle.

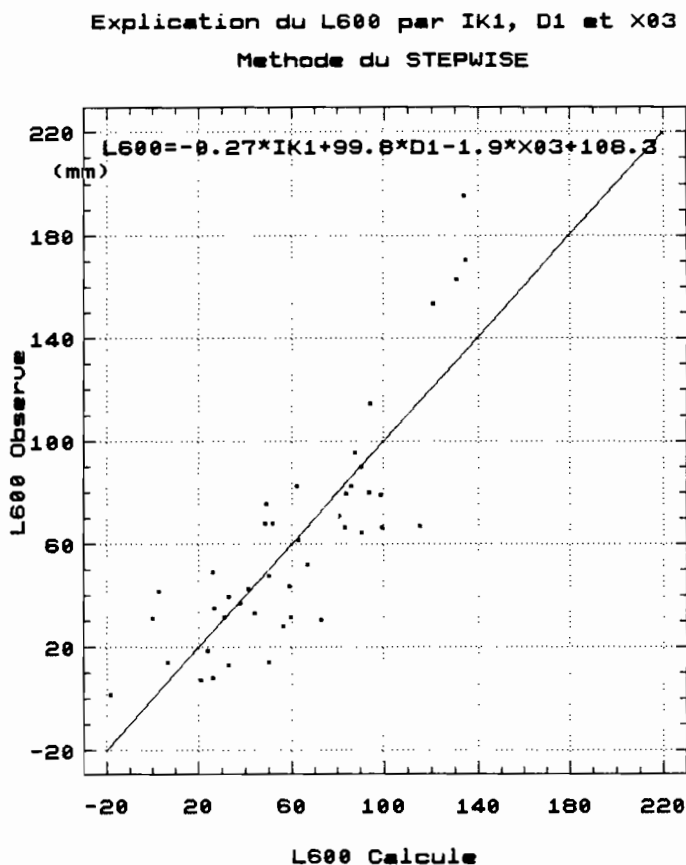
Figure 4.5.14 Calcul de L_{600} par la méthode du Stepwise (paramètre du modèle)

Sélection des paramètres par la méthode du Stepwise

Variable	Corrélation	Variance expliquée
1. CI	.1643	1.1103
2. IKX	.5399	16.4549
3. IKN	.1528	.9560
4. IK1	.5944	21.8508
5. X01	.0803	.2598
6. D1	.6418	28.0114
7. IK3	.2669	3.0689
8. X03	.4861	12.3752
9. D3	.5884	21.1830

Variabes sélectionnées	Coeff.	Variance expliquée
4. IK1	-0.26978	15.3820
6. D1	99.7536	25.1045
8. X03	-1.87659	19.0908

$r^2 = 0,71$



4.5.4. Première tentative de transposition

L'explication des L_{600} des bassins étudiés par les paramètres CSOL et CVEG en utilisant l'équation (4) proposée au paragraphe précédent est simple, cohérente et satisfaisante : 70 % de la variance est expliquée, ce qui correspond à un coefficient de corrélation de 0,84.

Deux problèmes majeurs se poseront cependant à l'utilisateur désireux d'appliquer cette formule sur des bassins inconnus :

- 1) Les 42 bassins étudiés ont fait l'objet d'études pédologiques spécifiques longues à mettre en oeuvre. Pour les répéter, même sommairement, sur le bassin inconnu, il faudra s'assurer de la participation d'un pédologue ayant une certaine expérience de l'hydrodynamique des versants et connaissant les sols des 42 bassins représentatifs étudiés.
- 2) Si l'on réussit, par extraordinaire, à obtenir le concours de ce spécialiste, il se rendra rapidement compte que l'estimation des paramètres CSOL et CVEG, base de la formule précédente, est empirique et très approximative !

Bref, l'application de cette formule, pourtant très simple sera... très compliquée. Que faire ? Comment traduire les critères subjectifs employés, fondés sur plusieurs années d'expérience, d'observation et de raisonnement ? Comment les transformer en critères plus impartiaux, basés sur les documents et les connaissances disponibles pour tous les bassins ?

Nous avons tenté (CADIÉ, 1984) d'établir une classification des bassins en six classes, classification basée sur des critères principaux (sol et sous-sol) et des critères secondaires (relief, végétation, aspect du réseau de drainage). Cette classification établie à partir de la typologie des bassins dont nous disposions à l'époque¹³, a été reportée dans le tableau 4.5.6. Ce tableau permet une description plus détaillée du bassin à classer. Son utilisation est sujette, malheureusement, aux mêmes difficultés que la formule précédente : pour classer correctement un bassin, il faudra s'assurer de la participation d'un pédologue spécialisé, qui devra connaître les sols des bassins représentatifs. Pour diminuer les difficultés d'utilisation pratique de la formule précédente et/ou du tableau 4.5.8, nous avons décidé d'utiliser deux nouvelles sources d'information : les modules du réseau général et les cartes de sols de l'EMBRAPA, qui feront l'objet du prochain chapitre.

13 Environ 50% de l'information actuelle.

Tableau 4.5.6 Première tentative de classification des petits bassins du Nordeste brésilien (selon CADIER, 1984)

Classe et L600	CRITERES DE CLASSIFICATION			CARACTERISTIQUES ASSOCIEES			
	Type et perméabilité de la FORMATION GEOLOGIQUE	SOL DOMINANT Type	Epaisseur et Perméabilité	Séquences typiques de sols dans le bassin	Végétation	Relief	Réseau de drainage
Cl: 0 L600: 0-6 mm	Sédimentaire perméable (Grès, dunes, calcaires, etc.)	AQ LA sableux Association LA+CA	Très épais > 2 m Très perméable (200mm/h)	AQ et LA situés sur les parties basses, quelques soient les sols en amont	Naturelle ou Culture	Nul ou faiblement ondulé	Inexistant ou très faible
Cl: 1 L600: 6-12 mm	Sédimentaire perméable p.e. Calcaires ou grès silteux Cristallin: granite grossier	CA+LA (texture moyenne) PE, TR, PL épais RE épais	Epais 1 à 2 m Perméable (100 mm/h)	CA, LA, PE, TR dans les parties hautes. PE dans les parties basses, sans affleurement rocheux.	Naturelle ou Culture	Faiblement ondulé	Peu dense
Cl: 2 L600: 12-24mm	Cristallin fissuré ou sédimentaire avec des zones imperméables	PVA NC verticale RE épais PL sans SS V	Epaisseur moyenne de 0,5 à 1 m Perméabilité modérée: 50 à 100 mm/h.	Sols avec une grande capacité de rétention dans les parties basses (PL, Alluvions,	Naturelle ou dégradée	Ondulé	Marqué
Cl: 3 L600: 24-48mm	Cristallin qui peut être fissuré ou Sédimentaire imperméable	NC, RE, Re PL+SS	Peu épais (0,5 m) Peu perméable (50mm/h)	Association PL+SS dans les parties basses. Quand la géologie le permet, quelques affleurements dans les parties hautes	Naturelle ou dégradée	Ondulé à fortement ondulé	Bien marqué
Cl: 4 L600: 48-96mm	Cristallins Sedimentaires imperméables argilites, latérites.	NC, Re, SS Re ras Sédiments argileux Latérites	Ras 0,5m Perméabilité faible <50mm/h	Proportion d'affleurement de roche ou de zones imperméables supérieures à 5% du bassin	Naturelle ou peu dégradée	Ondulé à montagneux	Dense
Cl: 5 L600: > 96 mm	Sous-sol imperméable: Cristallin sans faille ou sédimentaire imperméable	NC et Re ras, SS Latérites Affleurements Sédiments argileux Imperméabilisation artificielle (citermes, etc.)	Sols très ras. Perméabilité très faible	Proportion d'affleurement ou de zones imperméables supérieures à 25% Quand le relief est faible le sous-sol doit être totalement imperméable	Peu développée dans ce type de bassin	Tout type, de faible à montagneux	Très développé

Note: * Pour les classes 2, 3 et 4 la dégradation de la végétation naturelle peut apporter une demi à une classe supplémentaire.
* Voir en annexe les significations des abréviations des sols.

4.6 UTILISATION DES DONNEES DU RESEAU GENERAL

4.6.1. Pourquoi utiliser les données du réseau général ? Objectifs et stratégie.

Il nous faut maintenant établir des règles permettant une estimation quantitative des écoulements sur des bassins dépourvus d'information hydrologique. Rappelons les éléments dont nous disposons :

- a) **L'information acquise sur les bassins versants représentatifs ne permet pas d'établir directement ces règles.**

La typologie des régimes de ces bassins nous a permis de les hiérarchiser et de les regrouper de manière logique et cohérente en fonction de certaines de leurs caractéristiques physiques. Mais nous avons rencontré de grandes difficultés pour aller au delà d'une simple analyse qualitative. L'essai d'estimation des valeurs de L_{600} à partir de ces caractéristiques, présenté au paragraphe précédent, s'est révélé difficilement utilisable par de non-spécialistes.

Nous ne pouvons donc pas utiliser tels quels les résultats qualitatifs de la typologie des bassins, pour effectuer une transposition systématique des caractéristiques hydrologiques. Cette transposition requiert, en effet, une quantification des régimes que nous ne possédons pas encore.

- b) **Les précipitations, le sol et la végétation sont les principaux facteurs explicatifs des régimes, dans la zone semi-aride.**

Comme il fallait s'y attendre, la typologie des bassins montre que les caractéristiques des sols (caractéristiques hydrodynamiques et état de surface) et de la végétation sont les facteurs explicatifs principaux de ces regroupements. Rappelons que nous nous étions tout d'abord affranchis de l'influence des précipitations qui est le ou l'un des facteurs conditionnels des régimes les plus importants.

- c) **Contraste entre la cartographie "hydro-pédologique" spécifique établie sur les BVR et la cartographie générale du Nordeste effectuée par l'EMBRAPA.**

Les bassins représentatifs ont fait l'objet d'une cartographie pédologique détaillée, qui a été spécifiquement réalisée pour mieux comprendre les mécanismes hydrologiques. On a systématiquement observé, mesuré ou tenté d'estimer la perméabilité du sol, son épaisseur, sa capacité de rétention, l'état de sa surface et de la végétation ainsi que la situation des différentes unités de sols dans la toposéquence, c'est à dire sur le parcours de l'eau.

Cette information n'est malheureusement pas disponible sous cette forme dans les cartes pédologiques qui existent dans tout le Nordeste. Leur échelle est beaucoup moins détaillée. Ces cartes pédologiques utilisent la classification de l'EMBRAPA, qui a été établie principalement en fonction de critères de fertilité agronomique et accorde une importance secondaire aux caractéristiques hydrodynamiques. Ainsi, certains sols, portant le même nom, et donc peu ou pas

différenciés sur ces cartes, peuvent avoir des épaisseurs très variables ou présenter des horizons imperméables qui les rendront différents aux yeux des hydrologues. C'est le cas des planosols dont l'épaisseur et la situation dans la toposéquence commandent le comportement hydrologique, c'est aussi le cas des régosols pour lesquels l'existence et la profondeur de la couche imperméable appelée "*fragipan*" sera responsable des rares écoulements engendrés par ce type de sol.

d) Les stations du réseau général hydrométrique: une source d'information non encore utilisée.

Nous nous proposons d'utiliser maintenant l'information fournie par le réseau général, dans le but d'établir une **estimation quantitative** (et non plus qualitative) des écoulements fournis par différents **groupes ou classes de sol**. L'échelle des cartes de l'EMBRAPA semble compatible avec la taille des bassins du réseau général.

Nous utiliserons, à la fin de nos calculs, les résultats des bassins représentatifs pour valider cette estimation et proposer des coefficients correctifs spécifiques aux petits bassins.

Le schéma 4.6.1. résume l'ensemble de notre démarche.

4.6.2. Sélection et homogénéisation des données des bassins du réseau général

*** Critères de sélection des bassins.**

Nous avons sélectionné tous les bassins du réseau général hydrométrique qui possédaient les caractéristiques suivantes:

- 1) Etre situé dans la zone semi-aride, donc avec une pluviométrie moyenne inférieure à 800 mm. La partie du bassin qui reçoit plus de 1000 mm par an, s'il y en a une, doit être petite.
- 2) Avoir une surface inférieure à 5000 km².
- 3) Posséder une chronique de débits de longueur et de qualité suffisantes pour permettre une estimation acceptable des écoulements moyens annuels sur une période d'au moins soixante ans. Cette dernière condition, basée sur des critères d'évaluation subjectifs, est délicate à appliquer et requiert de l'expérience. Elle a finalement provoqué l'élimination de la plupart des stations répondant aux deux premières conditions.

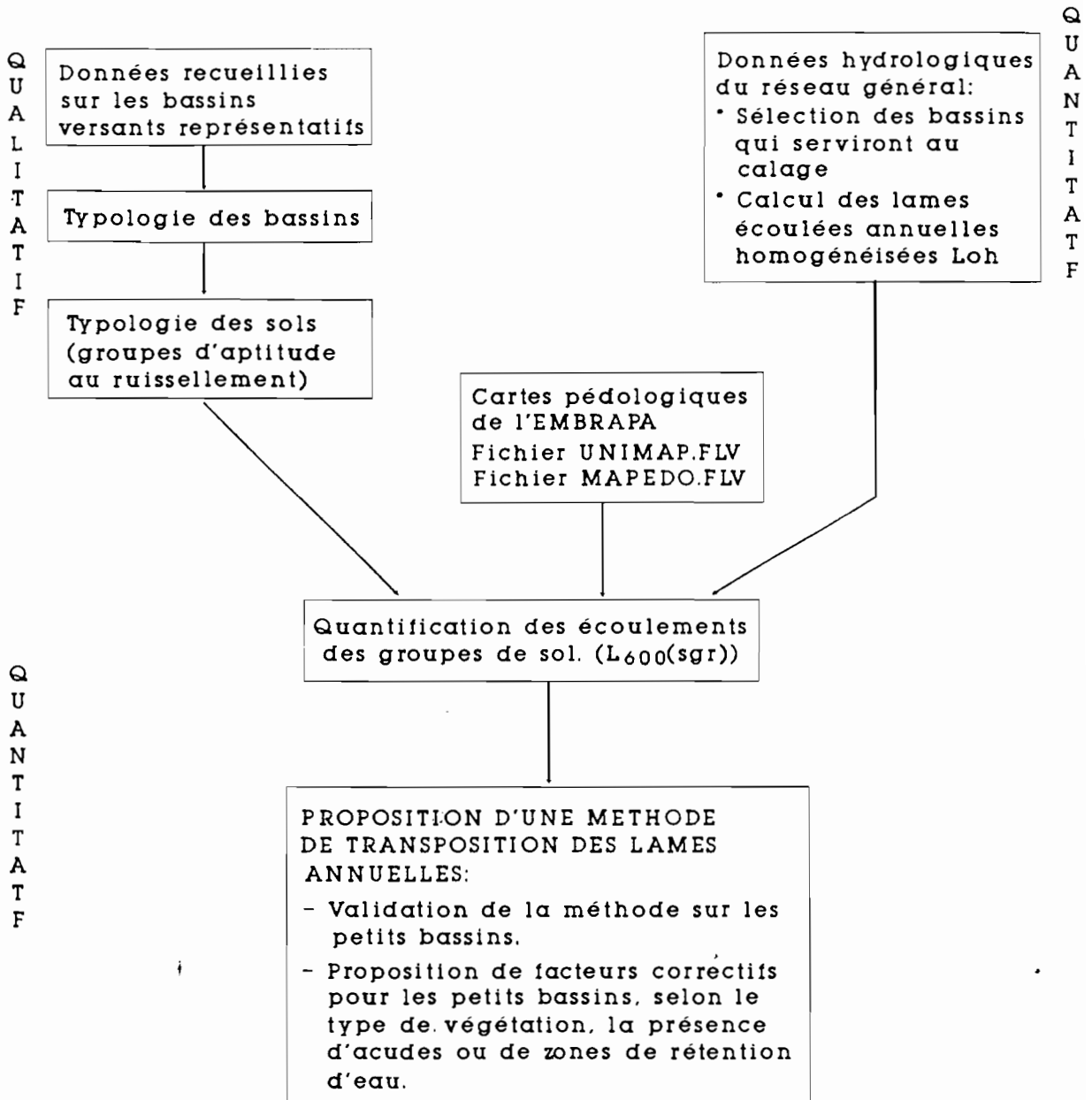


Figure 4.6.1 Utilisation du réseau général pour l'élaboration d'une méthode de transposition.

* Traitement et homogénéisation de l'information hydropluviométrique.

La figure 4.6.2 montre les bassins du réseau général qui ont finalement pu être retenus.

Ces 15 bassins sélectionnés¹⁴ sont pratiquement tous situés dans la partie cristalline de la zone semi-aride.

La moitié de ces bassins font partie du bassin du Val du Jaguaribe, dont les données ont bénéficié, historiquement, d'un meilleur suivi. Elles ont, en effet, été critiquées, puis ont fait l'objet d'analyses et d'interprétations effectuées par F.G. AGUIAR dans les années 30 et par le programme du GVJ dans les 60. Leur qualité est donc nettement meilleure. Près des trois quarts de l'ensemble des grands bassins retenus sont situés dans l'Etat du Ceará, les trois autres étant situés dans les Etats de la Paraíba, du Rio Grande do Norte et du Pernambuco.

* Calcul de la lame écoulée moyenne, Loh.

Nous avons traité et homogénéisé l'information fournie par ces quinze stations selon le protocole suivant, protocole dont le but est de fournir une estimation de la lame moyenne annuelle écoulée. Comme c'est souvent le cas, la chronique des débits est toujours plus courte que celles des précipitations. Les étapes de ce protocole ont été conçues pour obtenir une estimation des écoulements la plus indépendante possible des anomalies climatiques des périodes effectivement observées.

- a) Calcul de la chronique des lames écoulées annuelles observées (Lo_j). Le suffixe "o" signifie "observé", et l'indice "j" correspond à "l'année j".
- b) Sélection du plus grand nombre possible de pluviomètres de bonne qualité situés à l'intérieur du bassin (ou le plus proche possible quand il n'y en a pas).
- c) Calcul de la chronique d'un indice pluviométrique annuel (Po_j) par moyenne arithmétique des précipitations de ces pluviomètres pour la période dont on connaît les lames écoulées.
- d) Ajustement d'une fonction puissance aux chroniques des lames annuelles Po_j et des Lo_j , du type $L = a(P-b)^c(1)$; a, b et c sont les paramètres de cet ajustement, comme le montre l'exemple de la figure 4.6.3.
- e) Extension et homogénéisation de la chronique des indices pluviométriques. Pour cela, on ajuste et on utilise une régression¹⁵ entre les chroniques des indices pluviométriques (Po_j)

14 Le nombre, très faible, de bassins (15 bassins sur un total de 35 répondant aux deux premiers critères) qui ont finalement pu être retenus est une conséquence de la sévérité des critères de sélection, nécessaire pour obtenir une estimation acceptable de la moyenne longue durée. Il montre bien l'importance, l'urgence et l'actualité d'un programme de récupération et de réhabilitation du réseau général de mesure hydrométrique dans cette partie du Brésil. Il est, par exemple, frustrant et préoccupant de constater que nous n'avons pu sélectionner qu'une seule station dans tout l'Etat du Pernambuco, aucune dans l'Etat de la Bahia (dont la partie semi-aride couvre une surface supérieure à la France) ou qu'aucune de ces stations ne soit située dans la grande zone climatique de Transition.

15 Nous avons forcé la droite de cette régression à passer par l'origine, pour éviter que son utilisation pour l'extension des séries ne conduise à sous-estimer exagérément la variance des débits, compte tenu de la non-linéarité de la relation pluie-débit que nous utilisons.

et celles des séries pluviométriques observées aux postes pluviométriques de la plus longue durée, possible¹⁶ de bonne qualité et les plus proches possibles du bassin.

f) On applique enfin l'équation (1) pour compléter la chronique des débits à partir de la pluviométrie. On obtient ainsi une estimation "homogénéisée" ou encore une reconstitution critique de la lame écoulée moyenne interannuelle appelée Loh. La période d'homogénéisation varie entre 50 et 70 ans.

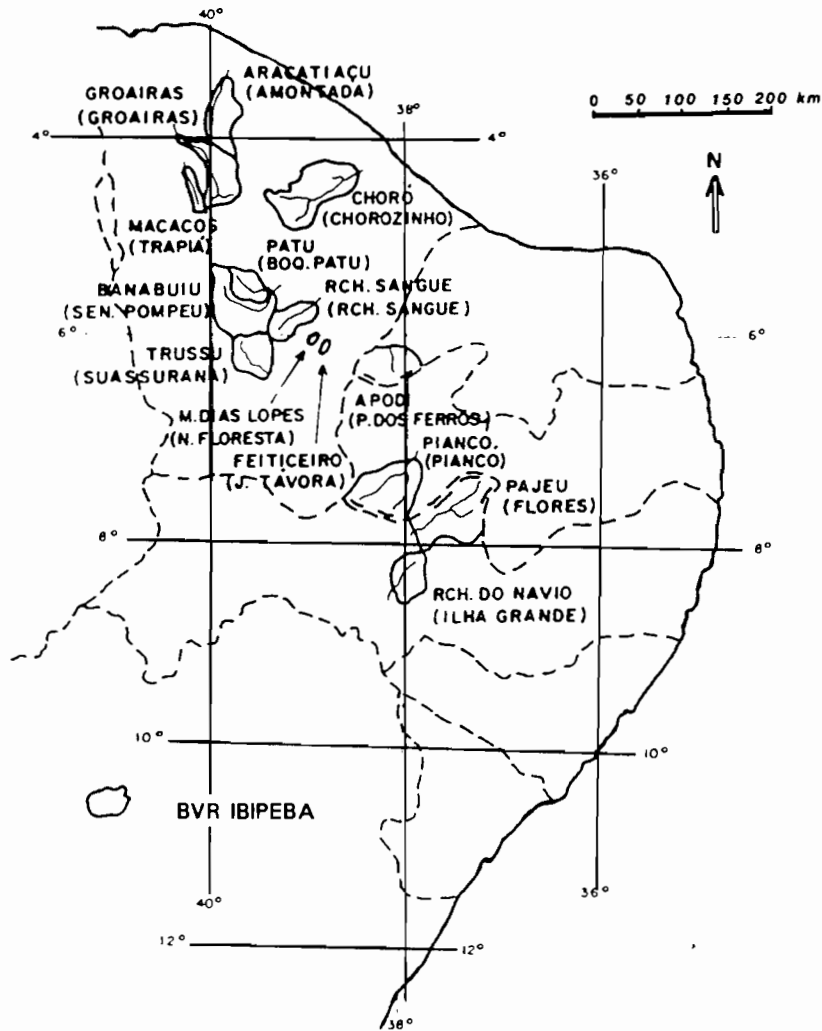


Figure 4.6.2 Carte de situation des bassins sélectionnées

Le tableau 4.6.1 montre quelques caractéristiques des bassins sélectionnés. Ce tableau contient également, en anticipant sur ce qui va suivre, les lames écoulées calculées avec la méthode que nous allons proposer.

Tableau 4.6.1 Principales caractéristiques des bassins sélectionnés :

Comparaison des écoulements calculés et observés.

No bassin	SURFACE en Km ²	PRECIPITATIONS P	ET ECOULEMENTS ANNUELS Loh	en mm L(p)
1-RCH. DOS MACACOS (TRAPIA)	1520	750	90	82,9
2-GROAIRAS (GROAIRAS)	2700	720	65	70,9
3-ARACATIAÇU	2800	700	79,9	77,3
4-CHORO (CHOROROZINHO)	4050	750	85,2	80,0
5-TRUSSU (SUSSUARAMA)	2068	770	57	62,0
6-M. DIAS LOPES (AC.NOVA FLORESTA)	161	718	68	68,4
7-FEITICEIRO (AC.JOAOQUIM TAVORA)	119	718	72	57,5
8-RCH. DO SANGUE (RCH. DO SANGUE)	1363	740	59,5	58,2
9-PATU (BOQ.PATU)	1021	817	76,5	77,3
10-BANABUIU (SENADOR POMPEU)	4555	703	58	59,2
11-APODI (PAU DOS FERROS)	2050	850	63,9	66,4
12-PIANCO (PIANCO)	4550	800	69,9	69,0
13-PAJEU (FLORES)	5066	620	37,3	44,9
14-RCH. DO NAVIO (ILHA GRANDE)	2372	470	17,8	24,5
15-IBIPEBA	321	600	10,8	10,0

- Avec : **P** = Précipitation moyenne.
- Loh** = Lame écoulée moyenne interannuelle (le suffixe "oh" signifie "observée puis homogénéisée").
- L(p)** = Lame calculée avec la méthode de transposition proposée.

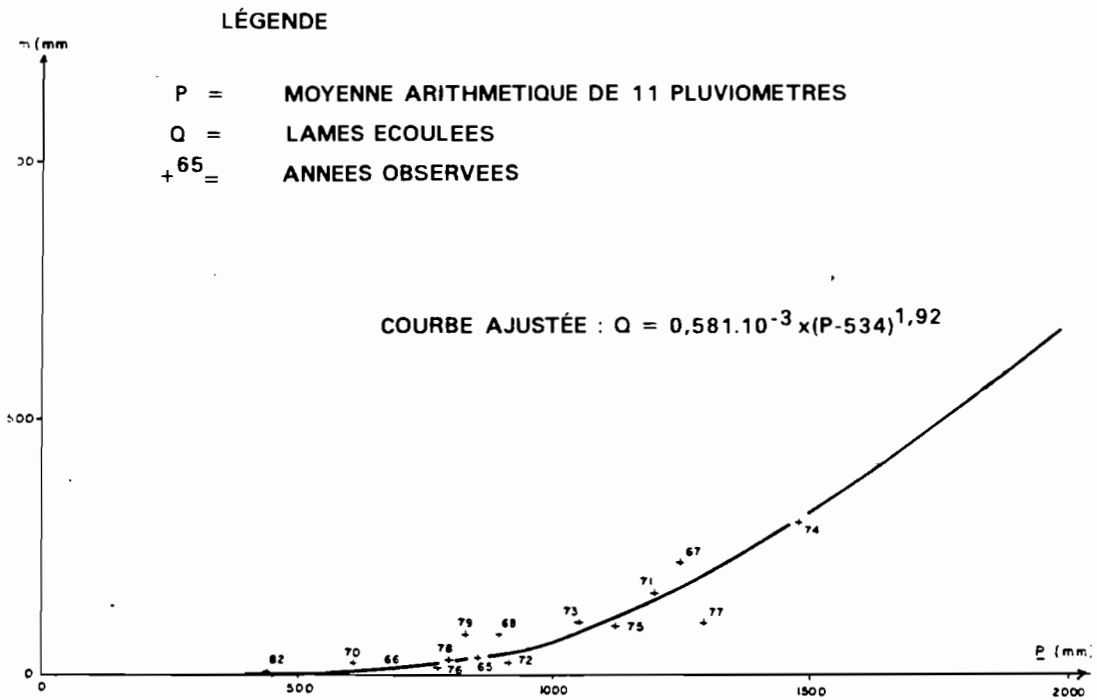


Figure 4.6.3 Exemple d'ajustement d'une fonction puissance entre lames écoulées et précipitées

4.6.3. Introduction de l'information pédologique et pluviométrique

4.6.3.1 Mise en forme de l'information pédo et pluviométrique: les fichiers UNIMAP et MAPEDO

Nous cherchons à expliquer les variations de Loh par celles des sols et de la pluviométrie. Pour cela, nous avons procédé de la façon suivante, pour chacun des bassins du tableau 4.6.1.

- 1) Détermination, par planimétrie, de la surface de chacune des **Unités Cartographiques Pédologiques (UC)** que l'on rencontre dans le bassin. Ces UC sont des associations de sols qui sont définies et délimitées sur les cartes de sols éditées par l'EMBRAPA. Ces cartes existent dans tout le Nordeste, à une échelle qui varie entre le 1:400.000 et le 1:1.000.000^{ème}.
- 2) Identification, pour chacune des UC, de la proportion et des caractéristiques des divers **types des sols (TS)** qui la composent.
- 3) Calcul de la pluie moyenne annuelle sur chaque UC. Ce calcul est effectué en superposant la carte des isohyètes et celles des UC comme le montre la figure 4.6.4. Si l'on constate une différence pluviométrique supérieure à 300 mm entre les parties la plus et la moins arrosées d'une UC, il faudra sous diviser cette UC en deux, pour ne pas avoir de différence supérieure à 300mm.

Ces informations ont été regroupées dans deux fichiers par Flávio H. BARRETO, pédologue de l'EMBRAPA.

- **MAPEDO.FLV**. Ce fichier indique, pour chaque bassin, la proportion couverte par chacune des UC et la précipitation moyenne, maxima et minima des UC. Il indique également la surface totale du bassin et la lame écoulee moyenne interannuelle Loh.

Nous montrons un extrait du fichier MAPEDO.FLV qui présente quelques unes des UC qui couvrent les bassins du réseau général de **BANABUIU**, **FEITICEIRO** et **MANOEL DIAS**.

Tableau 4.6.2. Extrait du fichier MAPEDO.FLV

Rio: MANOEL DIAS à NOVA FLORESTA

Bassin No: 6 Surface: 161 km² Loh: 68,0 mm Nombre d'UC: 2

Etat	UC	%	Pmoyen(mm)	Pmax	Pmin
CE	Red9	80.0	710.0	730.0	690.0
CE	Red5	20.0	710.0	720.0	700.0

Rio: FEITICEIRO à JOAQUIM TAVORA

Bassin No: 7 Surface: 119 km² Loh:72,0 mm Nombre d'UC: 2

Etat	UC	%	Pmoyen(mm)	Pmax	Pmin
CE	Red10	21.2	690.0	700.0	690.0
CE	PE39	78.8	695.0	690.0	690.0

Rio: BANABUIU à SENADOR POMPEU

Bassin No: 10 Surface: 4555 km2 Loh:58,0 mm Nombre d'UC: 13

Etat	UC	%	Pmoyen(mm)	Pmax	Pmin
CE	PE17	28.4	700.0	750.0	650.0
CE	BV1	10.1	700.0	720.0	680.0
CE	PE26	1	660.0	670.0	650.0
CE	Re6	6.8	680.0	710.0	650.0
CE	PE23	1.2	655.0	660.0	650.0
CE	NC3	5.7	680.0	710.0	650.0
CE	PE20	3.8	715.0	740.0	690.0
CE	BV2	13.2	755.0	820.0	690.0
CE	PE13	11.2	730.0	750.0	710.0
CE	Re5	0.1	675.0	680.0	670.0
CE	Re19	0.2	695.0	700.0	690.0
CE	BV3	12.3	740.0	790.0	690.0
CE	PE11	6	705.0	740.0	670.0

- UNIMAP.FLV contient la liste de toutes les unités cartographiques (UC) du Nordeste semi-aride. Ce fichier comprend les pourcentages et les caractéristiques¹⁷ des différents types de sols (TS) qui composent chaque UC. L'extrait du fichier UNIMAP.FLV présente 5 UC des bassins précédents

Tableau 4.6.3 Extrait du fichier UNIMAP.FLV (suite)

Nom du TS	Pourcentage couvert par le TS	Caractéristiques des TS					Perméabilité de MUNTZ
		Sous-classe (texture)	Horizon A	Classe de relief	Classe de Végétation		
CE NC3							
4 TS:							
Re	15.00	1.10	5.00	2.50	3.00	83.0	
NC.arg	50.00	1.70	4.10	2.00	3.00	32.0	
PL.ind	20.00	1.30	5.00	1.50	3.00	82.0	
SS.ind	15.00	1.30	5.00	1.00	3.00	8.0	
CE BV3							
3 TS:							
Re	20.00	1.10	3.70	2.50	2.00	83.0	
NC.arg	30.00	1.70	4.10	2.50	2.00	32.0	
BV.trun	50.00	1.70	6.00	2.50	2.00	24.1	
CE Re5							
2 TS:							
Re	60.00	1.10	4.50	4.50	2.00	83.0	
PE.arg	40.00	1.70	4.50	4.50	2.00	50.1	
CE Red9							
3 TS:							
Red	65.00	1.10	5.00	2.50	3.00	83.0	
NC.arg	20.00	1.70	4.10	2.50	3.00	32.0	
SS.ind	15.00	1.30	5.00	1.00	3.00	8.1	
CE Red5							
3 TS:							
Red	50.00d	1.10	4.50	4.00	2.00	83.07	
PE.arg	20.00	1.70	4.50	2.50	2.00	50.16	
NC.ind	30.00	1.51	4.10	2.50	2.00	40.16	

17 UNIMAP.FLV contient des indications sur les principales caractéristiques de chaque TS: texture, type d'horizon A, relief, végétation, profondeur, perméabilité.

Les caractéristiques des TS du fichier UNIMAP ont été définies suivant les conventions suivantes:

Signification des codes de texture (sous-classe) selon F.BARRETO

Code	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0
Signification	sableuse	sableuse à moyenne	sableuse à argileuse	moyenne à argileuse	argileuse	roche

Signification du code d'horizon A :

Code	1	2	3	4	5	6	7
Signification	humique	chernozémique	proéminent	d'épaisseur moyenne	peu épais	décapé	rocheux

Signification du code de relief :

Code	1	2	3	4	5
Signification	plan	ondulations douces	ondulé	fortement ondulé	montagneux ondulé

Signification du code de la végétation :

Code	1	2	3
Signification	forêt	formation hypoxérophile	formation hyperxérophile

Le tableau 4.6.4 fournit un ordre de grandeur de la taille du fichier UNIMAP.FLV, qui, imprimé, atteint une centaine de pages. Le nombre élevé d'UC est partiellement dû à l'incompatibilité des légendes des cartes des différents Etats. La taille importante de ce fichier rend indispensable l'emploi de techniques d'optimisation.

Tableau 4.6.4 Nombre d'UC et de TS contenu dans le fichier UNIMAP.FLV

	Tout le Nordeste	Nordeste semi-aride	15 Bassins étudiés
Nombre d'UC	1413	844	152
Nombre de TS	-	170	79

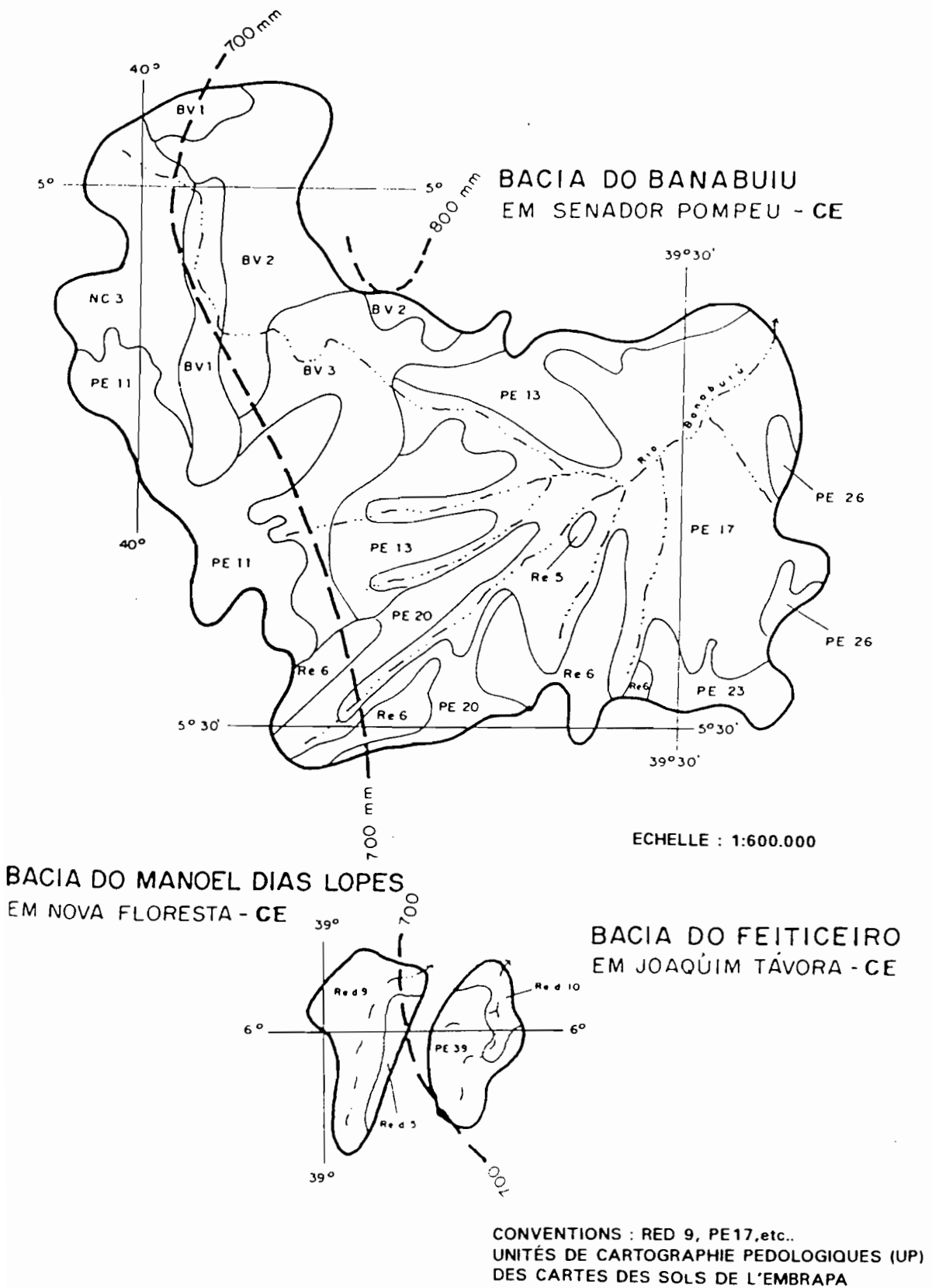


Figure 4.6.4 Exemple de carte pédologique et d'isohyètes pour trois grands bassins du réseau général

4.6.3.2 Typologie des sols : définition des groupes de sol

Nous chercherons, naturellement, à regrouper les différents types de sols (TS) recensés, en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques (épaisseur, porosité, capacité de rétention, perméabilité, présence de couche empêchant l'infiltration située à la surface du sol ou en profondeur, végétation, relief etc.).

Il nous faudra utiliser la nomenclature et les définitions proposées par les cartes de sols de l'EMBRAPA, qui sont les seuls documents disponibles dans tout le Nordeste.

Dans la légende de ces cartes, chaque type de sol (TS) est défini par:

- 1) Son nom : brun non calcique, latosol, etc.
- 2) Ce que nous avons appelé ses "caractéristiques additionnelles": teneur en argile, épaisseur, etc...

Nous avons défini les quatre groupes de sols suivants:

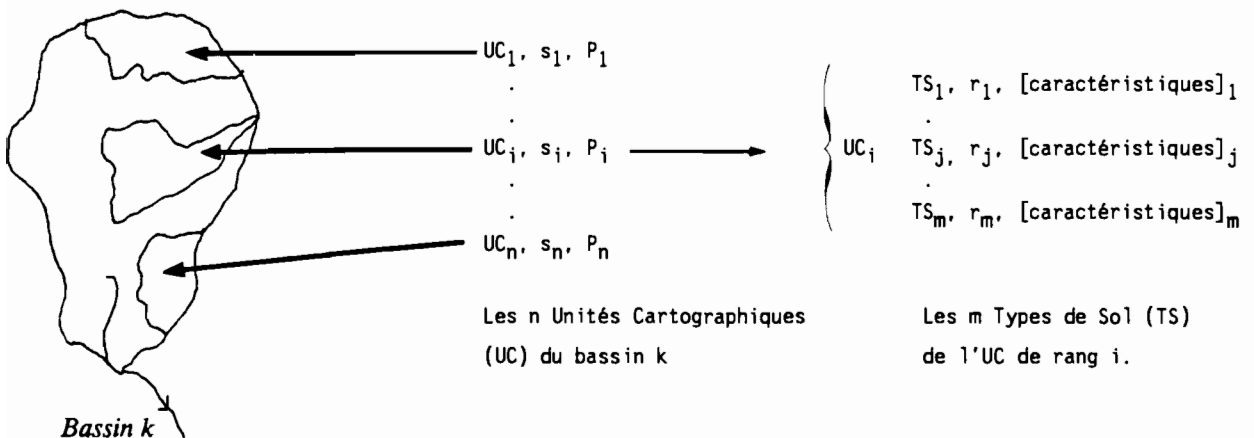
- Groupe 1* : Les sols très épais et perméables.
- Groupe 2* : Les sols assez épais et de perméabilité moyenne à élevée.
- Groupe 3* : Les sols d'épaisseur moyenne à faible et de perméabilité moyenne à faible.
- Groupe 4* : Sols présentant des caractéristiques hydrodynamiques particulières tels que des horizons bloquant l'infiltration, ou de très fortes hétérogénéités (par exemple, affleurements de roche imperméables entourés de sols sableux très perméables) ou encore des sols possédant des fentes de retrait (vertisols) etc..

A l'intérieur de chaque groupe nous avons défini plusieurs sous-groupes, dont nous chercherons à calculer les écoulements moyens interannuels ramenés à 600 mm, (coefficient L_{600}). La liste et les caractéristiques de ces sous-groupes se trouvent dans le tableau 4.6.5 du paragraphe 4.6.4.3.

4.6.4. Calcul des valeurs de L_{600} des sous-groupes de sol

4.6.4.1 Principe de la méthode d'optimisation

La subdivision d'un bassin en UC et TS peut se schématiser de la façon suivante:



La lame écoulée moyenne annuelle du bassin k peut-être calculée par la formule:

$$L_{cal_k} = \text{SIGMA}(UC=1,n)(L_{600}(UC) \times e^{(0,0033(P(UC)-600))18} \quad (1), \text{ avec:}$$

- UC sont les différentes UC qui composent le bassin.
- $P(UC)$ est la pluviométrie moyenne annuelle de chaque UC.
- $L_{600}(UC)$ est le coefficient L_{600} de l'UC, calculé de la façon suivante:

$$L_{600}(UC) = \text{SIGMA}(TS=1,m) (L_{600}(TS) \times r(TS)) \quad (2), \text{ avec:}$$

- $L_{600}(TS)$ est le L_{600} du sous-groupe de sol, auquel appartient le TS, c'est à dire $L_{600}(sgr)$. On trouvera la liste de ces sous-groupes dans le tableau 4.6.4.
- $r(TS)$ est la proportion du TS dans l'UC; il est défini dans les cartes de sol de l'EMBRAPA et dans le fichier UNIMAP.FLV.

En fin de compte, en regroupant les sols par sous-groupe, la lame calculée du bassin k peut s'écrire:

$$L_{cal_k} = \text{SIGMA}(sgr=1,t) (L_{600}(sgr) \times a(sgr)) \quad (3)$$

- sgr est le sous-groupe de sol.
- $L_{600}(sgr)$ est la lame L_{600} du sous-groupe de sol sgr .
- $a(sgr)$ est un coefficient qui dépend de la proportion totale et des caractéristiques des sols du sous-groupe sgr dans le bassin k , ainsi que de la pluviométrie de l'UC ou du TS [$a(sgr)$ dépend aussi d'autres caractéristiques spécifiques des sols du bassin que nous ne considérerons pas pour l'instant].

M. MONTGAILLARD (inédit, 1990) a implanté les programmes qui permettent le calcul des différents $L_{600}(sgr)$. Ces programmes, écrits en PASCAL et appelés CTL.PAS et OPTM.PAS, utilisent toute l'information des fichiers UNIMAP.FLV et MAPEDO.FLV, pour minimiser, à l'aide de l'algorithme de ROSENBROCK (1960), les trois critères suivants:

$$S_{rel} = \text{SIGMA}(k=1,nb)(L_{cal_{bassin\ k}} - L_{oh_{bassin\ k}})$$

$$S_{abs} = \text{SIGMA}(k=1,nb) ABS (L_{cal_{bassin\ k}} - L_{oh_{bassin\ k}})$$

$$S_{car} = \text{SIGMA}(k=1,nb)(L_{cal_{bassin\ k}} - L_{oh_{bassin\ k}})^2$$

Ces critères permettent de comparer les lames calculées L_{cal} avec les lames observées homogénéisées L_{oh}

18 Tous les bassins du réseau général sont situés dans la grande zone climatique Sertão et sont donc caractérisés par un coefficient climatique $C=1$, que nous ne transcrivons pas, pour simplifier.

4.6.4.2 Réalisation de l'optimisation: discussion, précautions et artifices

Ces calculs optimisent un nombre de variables (les L_{600} des sous-groupes) supérieur au nombre de bassins dont nous disposons. Ainsi, le nombre de variables est supérieur au nombre d'équations! Pour contourner cette situation (incontournable en toute rigueur), nous avons eu recours à un certain nombre d'artifices et imposé quelques conditions supplémentaires basées sur le bon sens et l'expérience, pour empêcher des dérapages de l'optimisation.

- * Ainsi il a fallu, tout d'abord, "empêcher" la méthode d'optimisation de modifier de manière excessive les valeurs de L_{600} de certains sols qui ne couvrent que de très petites surfaces. On comprend intuitivement que, pour compenser par exemple, une erreur de 5 mm sur le L_{600} d'un TS couvrant 25% d'un bassin, l'ordinateur (ou plutôt son programme) pourra proposer d'augmenter de 125 mm le L_{600} d'un TS ne couvrant que 1% du bassin. On pourra vite, si l'on n'y prend garde, atteindre des valeurs absurdes. En termes imagés, nous pourrions dire que l'on ne peut pas peser, en même temps et sur une même balance, une souris et un éléphant. Il suffit que l'éléphant s'alimente pour décupler l'estimation du poids de la souris...
- * On empêchera, par ailleurs, les L_{600} de sous-groupes différents d'accéder à des valeurs qui ne soient pas cohérentes avec ce que l'on sait du comportement hydrodynamique de leurs sols. Ainsi, on empêchera, par exemple, un sol plus épais d'avoir un L_{600} supérieur à celui d'un sol moins épais, toutes choses "égales" par ailleurs...

Nous avons également employé un autre artifice appelé l'optimisation "par partie": quand un type de sol n'est présent, de manière conséquente, que dans deux ou trois bassins, on effectue l'optimisation des L_{600} de ce TS uniquement avec ces bassins, puis on le "bloque" pour le reste des calculs.

La méthode de ROSENBROCK s'avère bien adaptée à ce type de contraintes puisqu'elle permet d'effectuer l'optimisation sur une, quelques-unes ou toutes les variables, en leur imposant les bornes que l'on veut.

Certains procédés que nous avons dû employer, ne sont pas très recommandables, car il sont porteurs "d'effets pervers". Ainsi, on ne sait plus, en fin de compte, quelles sont les valeurs qui correspondent à une réalité hydrologique ou pédologique. Pour reprendre notre premier exemple, on ne peut pas laisser le programme ajouter 125 mm au L_{600} du TS qui ne couvre que 1% du bassin. On va donc le fixer arbitrairement. Mais, qui nous dit que notre estimation est correcte? Nous avons été contraints et forcés d'utiliser ces procédés, faute d'avoir trouvé une autre solution.

4.6.4.3 Résultats obtenus: les valeurs de L_{600} , base de la transposition

L'optimisation est un calcul itératif ; nous avons pris comme point de départ des valeurs de L_{600} issues de la première classification proposée en 1983 pour les différents sous-groupes :

Le tableau 4.6.5 résume les principales caractéristiques et résultats obtenus pour chaque sous-groupe.

Tableau 4.6.5 Caractéristiques et valeurs de L_{600} des sous-groupes de sol.**Groupe 1: Sols épais, sableux très bien drainés.**

Sous-groupe	L_{600}	Sols et caractéristiques
1.1	0	Sables, dunes etc.
1.2	3	Régosols, dont l'horizon de blocage à l'infiltration, appelé "Fragipan" est à plus de 1,20 m de profondeur.

Groupe 2: Sols profonds de texture moyenne à argileuse, bien drainés qui doivent engendrer un écoulement faible à moyen.

Sous-groupe	L_{600}	Sols et caractéristiques
2.1	5	Sols épais de texture moyenne: latosols; cambisols; régosols avec fragipan entre 0,8 et 1,20 m.
2.2	10	Sols épais de texture moyenne à argileuse; latosols; cambisols.
2.3	15	Latosols et cambisols de texture argileuse. Sols podzoliques de texture sableuse à moyenne.
2.4	15	Cambisols, sols podzoliques de texture moyenne.
2.5	25	Sols alluviaux; podzoliques de texture moyenne à argileuse.
2.6	30	Podzoliques de texture moyenne à argileuse ou plinthique.

Groupe 3: Sols de profondeur moyenne (de 20 à 50 cm) et de perméabilité moyenne.

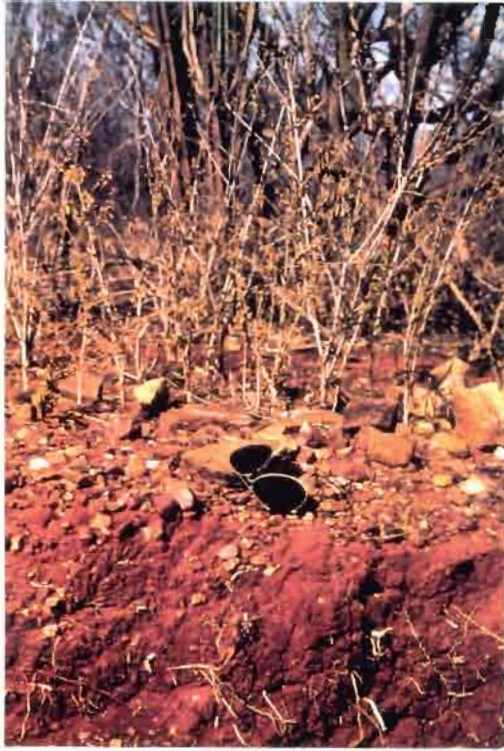
Sous-groupe	L_{600}	Sols et caractéristiques
3.1	37	Sols lithosoliques.
3.2	37	Podzoliques peu épais.
3.3	37	Brunizem.
3.4	37	Brun non calcique.
3.5	37	Cambisols et rendzines peu épais.
3.6	37	Sols argileux. (podzoliques, cambisols, bruns non calciques, litosoliques).
3.7	37	Podzoliques et "terra roxa" érodés.
3.8	60	Cambisols argileux et érodés.

Groupe 4: Sols dont l'hydrodynamique est particulière.

Sous-groupe	L_{600}	Sols et caractéristiques
4.1	25	Sols vertiques avec fentes de retrait. Vertisols, cambisols et brun non calciques vertiques.
4.2	25	Sols planosoliques. Bruns non calciques plan et planosols non solosodiques, épais.
4.3	60	Sols tronqués ou érodés. Bruninsem, bruns non calciques ou litosoliques.
4.4	70	Planosols solosodiques, quand ils sont peu épais, (Planosols dont l'horizon argileux est halomorphe).
4.5	125	Sols halomorphes.
4.6	37	Bruns non calciques érodés et vertiques.
4.7	50	Plintosol (sol à horizon imperméable).
4.8	70	Plintosol érodé.
4.9	37	Sols non déterminés.
5.0	90	Affleurements.

Les valeurs de L_{600} contenues dans ce tableau sont fondamentales et constituent la base de la méthode de transposition que nous proposons.

LES SOLS QUI COULENT



Sols bruns non calciques vertiques
(bassin de Sume) $L_{600} = 25\text{mm}$



Sols lithosoliques $L_{600} = 37\text{mm}$



Affleurements $L_{600} = 90\text{mm}$
Attention à l'hétérogénéité



Solonetz $L_{600} = 125\text{mm}$ attention au sel
noter l'aspect arrondi du sommet des
colonettes à la surface du sol

LES SOLS QUI NE COULENT PAS

(ils peuvent retenir l'eau en provenance de l'amont)



Sables quartziteux L₆₀₀ = 0mm



Latosols L₆₀₀ = 5 mm

AUTRES TYPES DE SOL



Erosion régressive sévère sur solonetz (L600 = 125 mm)(Açu-RN)



Vertisol (L600 = 25mm) Taua CE.



Cambisol (L600 de 5 à 60mm) Ibipecta(BA)



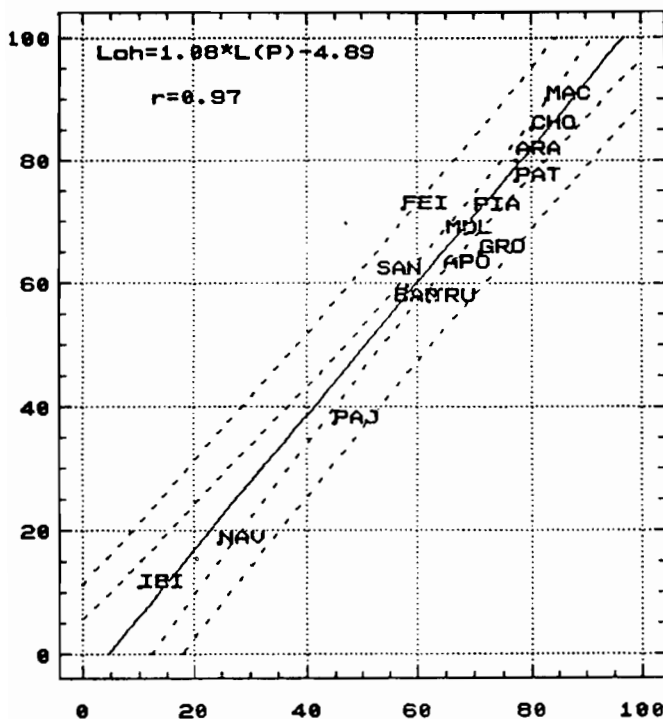
Sol podzolique (L600 = de 15 à 60mm) Juatama (CE)

■ Comparaison des lames calculées et observées des 15 bassins:

La figure 4.6.5 montre la cohérence entre les valeurs des lames calculées avec la méthode de transposition proposée $L(P)$ et l'estimation de la lame moyenne interannuelle L_{0h} des même bassins.

Les valeurs de $L(P)$ et de L_{0h} ont été présentées dans le tableau 4.6.1.

La corrélation entre les deux séries est bonne. Le coefficient de corrélation est de 0,97 et la droite de régression dont l'équation est $L_{0h} = 1,08 \times L(P) - 4,9$ mm, est proche de la première bissectrice.



Notons :

- a) La quasi-invariance du L_{600} des sols du groupe 3. Les "effets pervers" signalés plus haut doivent être minimes, puisque ces sols représentent plus de 50 % des surfaces des bassins étudiés. La convergence de l'optimisation vers 37 mm du L_{600} de ce groupe est très forte. Des essais réalisés avec 35 mm ou 40 mm donnent, par exemple, des résultats nettement plus mauvais. Nous n'avons pas réussi à différencier de manière nette les L_{600} des différents sous-groupes du groupe 3. Nous leur avons donc attribué la même valeur, à l'exception du sous-groupe 3.8.

Figure 4.6.5 Comparaison des lames calculées et observées

Ces sols, qui sont les plus courants, sont caractérisés par des épaisseurs variant entre 20 et 50 cm et des perméabilités moyennes (entre 20 et 60 mm/h mesurés avec la méthode de MUNTZ). Nous aurions, personnellement, tendance à qualifier ces sols de "normaux", sur le plan hydrologique. Ils coulent "normalement" à la suite de quelques pluies ou après une grosse pluie. Leur capacité de rétention permet aux cultures d'y supporter des périodes sèches de 8 à 10 jours. Ce sont des sols fréquemment pris en exemple par des hydrodynamiciens/modélisateurs du sol (MOLINIER *et al.*, 1989). Nous verrons, plus loin, que la valeur de 37 mm que nous proposons est très proche de ce que proposait F.G. AGUIAR pour les bassins du Ceará.

b) La convergence de l'optimisation sur les valeurs des L_{600} des groupes 1 et 2 est moins nette¹⁹. Nous avons quelques points de repère: les sables⁵ et les régosols ne coulent pas ou très peu. Il en est de même pour la majorité des latosols.

Le cas des cambisols et surtout des podzoliques est plus délicat, puisque leur L_{600} varie entre 5 et 60 mm, selon l'épaisseur, la perméabilité et les effets de l'érosion.

Quant aux alluvions, la valeur de 25 mm proposée est une moyenne très grossière, puisque des alluvions sableuses ne couleront pas du tout, alors que les alluvions argileuses seront complètement imperméables.

Si l'on considère la finalité pratique de ce travail, qui est l'établissement de normes de dimensionnement de barrages, on pourra tolérer une imprécision relativement plus importante sur les L_{600} des groupes 1 et 2, qui coulent peu. On ne construira pas de barrage en aval d'un bassin constitué uniquement de ces sols. Si, par contre, ces sols sont associés à des sols d'autres groupes, l'écoulement de ces derniers sera prédominant et masquera, donc, l'imprécision en question.

c) Les résultats du groupe 4, constitué de sols dont le comportement hydrodynamique est "particulier", sont plus difficiles à commenter.

Les solonetz :

La convergence vers la valeur de 125 mm (c'est la valeur de L_{600} la plus élevée que nous avons trouvée), atteinte par les solonetz et les sols halomorphes est très nette. Ceci correspond à ce que nous savons des caractéristiques hydrodynamiques de ces sols, qui sont imperméables.

Les planosols :

Ces sols sont constitués d'une couche de sable située sur une couche totalement imperméable et se trouvent dans les parties basses des bassins. On peut penser qu'au cours de la saison des pluies la partie basse des toposéquences se sature et devient imperméable, d'une manière analogue aux phénomènes de zone contributive à surface variable décrits par HEWLETT et NUTTER (1970), et MEROT (1988). Ceci pourrait expliquer que la contribution des planosols, sur des bassins d'une certaine taille, soit supérieure à ce que laisserait prévoir leur perméabilité.

¹⁹ La méthode d'optimisation employée conduit à une erreur absolue constante sur la valeur des L_{600} des différents TS. Ceci conduit évidemment à des erreurs relatives plus importantes pour les L_{600} des sols qui "coulent peu".

Nous avons proposé deux valeurs pour le L_{600} des **planosols** :

- $L_{600} = 25$ quand leur horizon A sableux est épais et qu'ils ne sont pas solosodiques.
- $L_{600} = 70$ quand, au contraire, l'horizon A n'est pas épais et que le planosol est solosodique. Dans ce cas le planosol est très proche d'un solonetz.

Ceci nous a conduit à réviser, à la hausse, la valeur que nous avons proposée en 1983.

Des situations intermédiaires existent, bien sûr. L'épaisseur de la couche de sable et la situation dans la toposéquence constituent les clefs du comportement des planosols.

Les vertisols :

La valeur modérée des **vertisols** ($L_{600} = 25$ mm) est également difficile à interpréter. Ces sols sont perméables, "en grand" quand ils sont desséchés, à cause de leurs fentes de retrait. Une fois saturés, leurs argiles gonflent et ils deviennent totalement imperméables. Pour compliquer les choses, ces vertisols sont situés sur des parties planes où, finalement, l'eau refusée par le sol peut rester sur place jusqu'à ce qu'elle s'évapore ou même former de petits lacs. Cette valeur de 25 mm doit être considérée comme une moyenne grossière qui peut masquer de fortes variations. Il semble que, comme nous l'avons constaté sur les bassins de TAUA et de SUMÉ, les vertisols ou les sols vertiques engendrent finalement des écoulements assez faibles.

Les affleurements :

La valeur de 90 mm proposée pour les **affleurements rocheux** correspond, elle aussi, à une moyenne régionale qui intègre des valeurs et des situations très variables:

- . Un affleurement entouré de sable peut ne pas couler du tout; ça peut être le cas des chaos de boules granitiques. On observe ainsi, fréquemment, des matériaux d'origine détritique fortement perméables situés immédiatement en aval des affleurements. Cette association diminue fortement l'écoulement que l'on pourrait attendre d'une région accidentée et rocheuse. C'est le cas du bassin représentatif de JUATAMA.
- . Inversement un affleurement uniforme, constituant un "impluvium parfait" devrait avoir un L_{600} proche, théoriquement, de 600 mm. (370 mm selon les calculs effectués en 1983).

4.6.4.4 Importance relative des facteurs explicatifs "sol" et "pluie"

Les calculs d'optimisation que nous avons effectués ont pris en compte l'influence des précipitations annuelles par la formule:

$$L(P) = L_{(600)} \cdot e^{0,0033(P-600)}$$

Nous avons cherché à savoir quel était le poids réel des facteurs "précipitation" et "groupes de sol", dans l'explication de la variance des lames écoulées Loh.

Pour cela, nous avons considéré quatre situations différentes:

Tableau 4.6.6 Explication des écoulements apportée par la pluie et le sol.

Facteur explicatif pris en compte	% d'explication de la variance	Corrélation Loh x L(P)	Critères		
			Scar (mm ²)	Sabs (mm)	Srel (mm)
SOL et PLUIE: Pluie réelle; L ₆₀₀ optimisée.	87	0,94	467	62	-2
SOL SEUL: Pluie bloquée à 710 mm; L ₆₀₀ optimisée.	63	0,78	2910	166	-8
PLUIE SEULE: Pluie réelle; L ₆₀₀ bloquée à 42,7 mm.	39	0,60	4650	228	+8
NI L'UN NI L'AUTRE: Pluie bloquée à 710 mm; L ₆₀₀ bloquée à 42,7 mm.	0	0	7280	246	+10

Notes:

P = 710 mm et L₆₀₀ = 42,7 mm sont des valeurs moyennes pour les bassins étudiés. La prise en compte de ces valeurs permet d'obtenir une valeur maximum pour le pourcentage d'explication du facteur non bloqué.

Ces calculs ont été faits avec un échantillon de bassin général plus important que celui des 15 bassins mentionnés dans le tableau 4.6.1. Ceci explique que le coefficient de corrélation entre Loh et L(P) soit inférieur à celui proposé par la figure 4.6.5.

Il apparaît donc que, pour les bassins étudiés, le sol soit le premier facteur explicatif des variations des écoulements. Notons que les précipitations moyennes sur ces bassins ne varient pas beaucoup. Si ce n'était pas le cas, il est possible que l'importance relative des facteurs "sol" et "pluie" s'inverse.

4.6.4.5 Tentative de mise en évidence d'autres facteurs explicatifs

Une fois admises les valeurs de L_{600} de chaque sous-groupe de sol, nous avons cherché à appliquer la même méthode d'optimisation au deuxième terme de l'équation (3) du paragraphe 4.6.4.1.

Ce coefficient, que nous avons appelé a (sgr), n'a contenu, jusqu'à présent, que les formules permettant d'introduire la correction par la précipitation annuelle. Nous allons maintenant utiliser ce coefficient pour tenter de mettre en évidence le rôle des caractéristiques des types de sol contenues dans le fichier UNIMAP.FLV. Rappelons que la plupart de ces caractéristiques (texture, type d'horizon A, relief, végétation, profondeur et vitesse d'infiltration) proviennent directement des légendes des cartes de sols de l'EMBRAPA.

* Les caractéristiques des TS:

Les résultats de cette deuxième tentative d'optimisation sont très décevants:

On a essayé, par exemple, d'introduire une formule de correction du type:

$$L_{\text{améliorée}} = L_{\text{cal}}(\text{Relief}-R_o)^a \times (\text{Horizon A} - H_o)^b \times (\text{Végét.} - V_o)^c \times (\text{Text.} - T_o)^d \dots$$

Les calculs sont effectués pour chaque TS de chacune des UC de chaque bassin, étant entendu que les coefficients à optimiser ($a, b, c, d, R_o, H_o, V_o, T_o, \text{etc.}$) doivent être les mêmes pour tous les bassins et tous les TS.

Les corrections trouvées sont dépourvues de signification statistique et semblent même, parfois, contraires à la logique. On trouve, par exemple, une légère (mais, heureusement, non significative) corrélation négative entre l'écoulement et le relief!

* La pluviométrie :

Nous avons également essayé d'améliorer le coefficient $A = 0,0033$ de la formule de correction pluviométrique. Sans plus de succès. L'algorithme de ROSENBROCK confirmant la valeur issue des études de bassins représentatifs.

*** En conclusion :**

La méthode de ROSENBROCK ne parvient donc pas à mettre en évidence ou à proposer une correction des écarts résiduels à partir des valeurs des facteurs conditionnels utilisés, de manière classique, en hydrologie, qui sont le relief, la végétation, l'épaisseur du sol ou sa perméabilité. Elle ne parvient pas, non plus, à proposer une amélioration du coefficient de correction pluviométrique $A = 0,0033$ que nous avons admis à priori

Ces échecs sont frustrants, mais, après réflexion, paraissent normaux pour les raisons suivantes:

- 1) Nous avons tenté d'améliorer un ensemble d'équations dont une partie des coefficients avaient déjà été optimisés. Il est donc normal que l'on ne puisse plus apporter de grandes améliorations aux critères d'optimisation, surtout si l'on considère le volume insuffisant d'informations dont nous disposons
- 2) En fait le type de sol (TS) ou son sous-groupe (sgr) contient implicitement une bonne partie des facteurs conditionnels dont nous avons voulu tester l'influence. Ainsi,
 - les planosols sont toujours sur un relief faible;
 - les latosols sont toujours des sols épais;
 - les sables sont toujours des sols perméables, etc.

Donc le L_{600} calculé pour chaque sous-groupe contient déjà une bonne partie de l'information que l'on voudrait apporter avec les facteurs conditionnels. Ceci explique partiellement les échecs que nous avons essayés.

- 3) La cartographie de l'EMBRAPA a été réalisée à petite échelle, sans chercher à représenter spécialement les caractéristiques hydrodynamiques des sols. Ces cartes permettent l'estimation de moyennes régionales, mais il serait déraisonnable d'espérer obtenir avec ce type de carte et un si petit nombre de bassins, une estimation et une compréhension plus fines des variations des L_{600} des différents TS. Il sera nécessaire, pour cela, de concevoir et d'exécuter des études spécifiques.

4.6.5. Adaptation de la formule aux petits bassins

Les formules proposées pour le calcul des valeurs de L_{600} et de $L(P)$ des différents groupes de sol ont été ajustées, nous l'avons vu, sur une quinzaine de bassins du réseau général, qui sont, pour la plupart, situés sur le socle cristallin et dans le Sertão Nord semi-aride, principalement dans l'Etat du Ceará. Les valeurs que nous proposons correspondent donc au comportement moyen de ces bassins, de leurs sols, de leur couverture végétale, de la densité des açudes qui y sont éparpillées et des séquences dominantes des différents sols le long des versants (ou toposéquence).

Quand les bassins deviennent plus petits, la variabilité imposée par ces facteurs s'accroît. Il faudra corriger les lames écoulées calculées à l'aide des UC ou des TS, par un ou plusieurs *facteurs correctifs* qui prendront en compte les spécificités ou les différences de chaque petit bassin, par rapport aux conditions moyennes régionales.

Ces facteurs correctifs doivent prendre en compte:

- L'influence de la taille et du nombre des açudes présents à l'intérieur du bassin.
- L'influence des anomalies de la couverture végétale.
- L'influence de zones perméables, situées sur le parcours de l'eau et susceptibles de retenir une partie des écoulements (c'est souvent le cas quand la perméabilité augmente de l'amont vers l'aval).
- L'influence de la taille du bassin.
- Toute autre anomalie non intégrée dans les points précédents.

De quelles données et de quelle information disposons-nous pour évaluer ces facteurs correctifs?

4.6.5.1 Influence de la couverture végétale (correction CV)

■ Conditions de référence de la couverture végétale.

Les valeurs de L_{600} proposées pour les UC ou les TS correspondent à des situations moyennes (ou centrales) de la couverture végétale, dans les conditions actuelles de cette partie semi-aride du Nordeste, qui sont intermédiaires entre une couverture vierge, non défrichée, et une mise en culture totale.

■ Informations quantitatives disponibles au sujet de l'influence de la couverture végétale sur l'écoulement.

Le bon sens nous indique que la végétation intervient dans la genèse de l'écoulement de plusieurs manières:

- Par l'interception directe de la pluie par sa partie aérienne étudiée par exemple par BULTOT *et al* (1976), FRANKEN *et al* (1982), GIRARD (1974).
- Par les modifications induites dans le sous-sol par ses racines ou par la faune qui lui est associée.
- Par l'influence de la litière de feuilles et de débris sur la surface du sol.
- Par l'influence des pratiques culturales (cultures en billons, sondages, etc) qui accompagnent certaines cultures.

On ne dispose, en réalité, que de très peu d'informations chiffrées sur l'influence de la végétation sur l'écoulement.

LA VEGETATION



Catinga en saison sèche



et en saison des pluies



Ses variations brutales



Planter dans le sens de la pente,
c'est plus facile...

■ Résultats obtenus sur parcelles.

En étudiant un échantillon composé de 72 parcelles de surfaces comprises entre 100 m² et 1 ha, BARRETO *et al* (1989) ont montré que, pour des couvertures pédologiques de Régosol (RE) et de sol Brun Non Calciq (NC), les écoulements peuvent s'accroître de près de cinq fois, quand la couverture végétale passe d'une caatinga native, bien conservée (qui assure au sol une protection maximale) à une mise en culture totale (sol découvert).

Sur le bassin Expérimental de Sumé (PB), en étudiant le comportement de 4 micro-bassins couverts de sols Brun Non Calciques Vertiques, nous avons mis en évidence un accroissement de l'écoulement dans un rapport de 7, suite au défrichement. Le coefficient L_{600} , en effet, passe de 9 mm à 65 mm, à la suite d'une mise en culture de deux des micro-bassins. Plus tard, après avoir soumis, durant trois ans, ces mêmes micro-bassins à une érosion intensive qui a décapé les couches supérieures des sols, la valeur de L_{600} a bondi vers 180 mm, ce qui signifie que les valeurs initiales ont été multipliées par un facteur de 20. Rappelons que la L_{600} proposée, pour le sol Brun Non Calciq Vertique, est de 25 mm, valeur qui peut donc, en fait, varier entre 9 et 180 mm selon la dégradation de la végétation et de la surface du sol!

■ Résultats obtenus sur petits bassins:

Sur le bassin Versant Expérimental de Tauá (CE), il a été mis en évidence des variations de L_{600} de l'ordre de 50% pour des bassins de plus grande taille (de surfaces de 1 à 10 km²), en fonction de variations de la couverture végétale. Cette fois, les bassins avaient été modifiés par les paysans, sans intervention des équipes de recherche et donc dans des conditions plus proches des variations que l'on observe normalement dans le Nordeste.

Ces chiffres montrent l'influence très forte que peut avoir la couverture végétale sur l'écoulement. Cependant, il faut souligner que, mis à part le cas de Tauá, ces variations correspondent à des expérimentations qui impliquent des modifications extrêmes, qui sont très rares sur des surfaces plus importantes.

■ Sols très perméables ou très imperméables:

Notons enfin que pour les sols perméables comme les régosols, les latosols, ou les sols podzoliques épais, la dégradation de la couverture végétale n'arrivera pas à augmenter de manière aussi forte l'écoulement, avec la condition expresse que cette dégradation ne provoque pas la formation d'une croûte imperméable. De même, l'influence des variations de la couverture végétale sur le ruissellement de sols très imperméables, comme des solonetz ou des affleurements, sera relativement faible.

En conclusion (et bien que l'on ait montré à SUME que la végétation pouvait diviser par 3 ou multiplier par 6 l'écoulement moyen), nous proposerons un intervalle plus réduit pour le facteur correctif multiplicatif (CV) de L_{600} par la végétation.

■ **Facteur de correction CV proposé:**

- Pour les conditions moyennes actuelles du Sertão, CV vaut 1.
- Pour les sols, ni très imperméables, ni très perméables, dont le coefficient L_{600} est compris entre 20 et 50 mm, CV peut varier entre 0,5 et 2,0 selon l'état de la végétation. Nous avons volontairement exclu les valeurs extrêmes qui peuvent survenir, mais sont peu probables sur des bassins de taille supérieure à 1 km². Pour des sols très perméables $L_{600} < 20$ mm, ou peu perméables $L_{600} > 50$ mm, les variations de CV doivent être plus faibles. Nous proposerons, dans ce cas, un intervalle maximum de 0,75 à 1,50.

Tableau 4.6.7 Facteur de correction CV

Etat de la couverture végétale	Extrêmement bien Conservée	Bien Conservée	Occupation normale	Très dégradée	Extrêmement dégradée
L_{600} compris entre 20 et 50 mm L_{600} inférieur à 20 ou supérieur à 50 mm	0,5 (0,75)	0,75 (0,9)	1 1	1,5 (1,25)	2 (1,5)

* On doit surtout considérer le degré de protection du sol et d'interception des précipitations assuré par la végétation. Ainsi, un pâturage en bon état, c'est à dire dans lequel les plantes créent une couche continue et dense qui protège totalement le sol, peut être mis dans la classe "végétation bien (ou extrêmement bien) conservée", puisqu'il est équivalent, en termes d'interception de précipitation, à une caatinga native (CV = 0,5 ou 0,75). Les zones de sol nu, sans couverture végétale et au sol compacté, doivent être considérées comme "extrêmement dégradées" (CV = 2).

4.6.5.2 Correction due à la présence d'açudes dans le bassin versant (correction CA)

■ **Densité d'açudes dans les conditions de référence.**

Les valeurs de L_{600} proposées ont été établies pour les conditions régnant actuellement sur les 14 grands bassins du réseau général utilisé. Dans ces bassins, on peut estimer que les açudes existants contrôlent, en moyenne, 30 à 50 % de la surface, avec un volume total d'emmagasinage de l'ordre de 25 à 50 % du volume naturel moyen écoulé. Quand les volumes et surfaces contrôlés par des açudes situés à l'intérieur du bassin étudié sont proches des valeurs de références indiquées ci-dessus, il n'y a pas lieu d'effectuer de correction.

Par contre, il n'y a pratiquement pas d'açude, dans les zones sédimentaires.

■ **Informations quantitatives existantes.**

Des études réalisées sur le bassin versant expérimental de Taua (CE) mettent en évidence une diminution de plus de 50 % de la lame écoulée entre les bassins versants élémentaires qui ne contiennent aucun açude et le bassin le plus grand d'une surface de 180 km², qui contient 30 açudes.

DUBREUIL et GIRARD (1970) ont estimé que, sur le bassin du Jaguaribe, le volume total des açudes équivalait à une lame de 18 mm, c'est à dire à près de 40 % de l'écoulement moyen annuel.

Ces chercheurs ont également mis en évidence, sur le bassin test du rio SITIA de 2.000 km² de surface, une diminution de 32 % de l'écoulement moyen, induit par l'existence de nombreux réservoirs. Un simple calcul montre que cette diminution de 32% correspond à un coefficient de correction CA de 1,47. Ces açudes du rio SITIA ont une capacité totale équivalente à une lame de 37 mm, soit 42 % de l'écoulement moyen.

MOLLE (1991b et c) a constaté des densités d'açudes supérieures à 0,7 par km² sur le bassin du rio SACO. La surface totale des miroirs d'eau atteint 5,5 % de la surface de ce bassin.

■ Facteur de correction (CA) proposé

Comme pour la végétation, nous définirons un facteur correctif d'açude CA, qui dépendra des caractéristiques des açudes déjà existants dans le bassin d'alimentation.

Ce coefficient varie, normalement, entre 1 et 1,6, mais peut être exceptionnellement inférieur à 1, quand le nombre et le volume des açudes situés en amont sont extrêmement élevés. Dans ce cas, on recommande la réalisation d'une étude spécifique plus détaillée.

Tableau 4.6.8 Facteur de correction (CA) proposé

Formule de correction: $L_{600} \text{ corrigée} = CA \times L_{600}$

Valeurs du coefficient de correction CA pour les zones cristallines

Densité d'açudes	Très forte: supérieure à 0,5 ac/km ² ou présence de très grand açude	Normale**	Nulle
Coefficient de Correction CA	< 1	1	1,6

* Nécessité de réaliser une étude spécifique,

** Volume total des açudes de l'ordre de 40% de l'écoulement annuel; densité entre 0,25 et 0,5 açude par km², la surface contrôlée par les açudes varie entre 30% et 50% de la surface totale.

Soulignons la nécessité de multiplier par 1,6 les lames L_p et les volumes écoulés calculés pour de petits bassins, quand ils sont totalement dépourvus d'açudes.

4.6.5.3 Influence de zones de rétention situées sur le parcours de l'eau (correction CL)

L'eau de ruissellement est retenue en plus ou moins grande quantité en plusieurs points préférentiels de son parcours:

- Zone alluviale de piedmont quand elle est épaisse et perméable.
- Zone alluviale bordant les cours d'eau.
- Dépressions.
- Zones karstiques.

L'importance relative des zones planes et alluviales s'accroît généralement avec la taille du bassin. Tout le problème consiste à évaluer le volume effectif du ruissellement qui peut être retenu.

■ L'information chiffrée directe dont nous disposons pour estimer CL est très mince.

Nous constatons cependant que :

- Dans les zones cristallines, les lames écoulées des petits aèdes de TAUUA, qui sont pratiquement dépourvus de zone de rétention, sont bien supérieures à celles des sous-bassins du RIACHO DO NAVIO ou de SUME où l'on observe, soit des zones alluviales importantes, soit des sols perméables situés en bas des versants (régosols de SALOBRO sur le bassin du RIACHO DO NAVIO).
- Les écoulements du bassin de JUATAMA sont bien inférieurs à ce que l'on pourrait attendre de zones imperméables constituées d'affleurements rocheux et de solonetz. Or on rencontre dans la toposéquence de ce bassin deux unités de sols qui sont de parfaits exemples de zones de rétention.
- Les écoulements faibles du bassin d'IBIPEBA sont dus, tout d'abord, à la forte perméabilité de ses sols, mais aussi à des phénomènes karstiques et/ou à la présence de formations sableuses comme celle que l'on rencontre en aval du bassin de Lagedo de Baixo.
- Les pertes et la diminution de l'écoulement qui surviennent dans les lits des bassins ou dans les dépressions, comme celle qui est située immédiatement en amont de la station principale de Lagoa Grande sont flagrantes. HERBAUD *et al* (1989a) en ont proposé une estimation.

Ces quelques exemples montrent clairement que les zones perméables, qui retiennent ou absorbent l'eau ont un poids bien plus important que ne le laisserait prévoir la pondération des lames écoulées que nous effectuons pour estimer les L_{600} des UC, quand elles sont situées en aval. *La perméabilité croissante des sols de l'amont vers l'aval ou la présence de zones de sols très perméables en aval des versants constitue donc un important facteur inhibant du ruissellement.*

En conclusion, nous proposerons une plage de variation de 0,8 à 1,2 pour le facteur de correction CL.

Tableau 4.6.9 Facteur de correction CL

IMPORTANTCE MECANISME DE RETENTION	Très élevée	Elevée	Normale	faible ou nulle
Facteur CL	0.8	0.9	1	1.2

4.6.5.4 Rôle de la surface

La plupart des auteurs attribuent une influence négative de la surface sur l'écoulement: "*plus le bassin est grand, moins les lames écoulées seront importantes*".

Nous avons trouvé un coefficient de corrélation assez faible mais négatif $r = - 0,35$ entre les L_{600} et la surface de l'ensemble des bassins représentatifs.

$$L_{600} = - 0,15 * SUP + 68,4$$

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette diminution:

- 1) Quand la taille du bassin s'accroît, l'importance relative des zones alluviales, qui sont souvent perméables, devient plus grande.
- 2) Les zones de rétention, définies plus haut, sont statistiquement plus importantes et plus nombreuses, dans les plus grands bassins.
- 3) Des phénomènes d'endoréisme ou de karst, sont plus fréquents sur les grands bassins.

Considérons maintenant le cas particulier de l'application de la méthode de transposition que nous proposons dans le Nordeste. Nous constatons que:

- Les facteurs indiqués aux points 1 et 2 ont déjà été pris en compte soit dans le calcul des coefficients L_{600} des UC, des TS, soit par le facteur de correction CL.
- Dans la zone semi-aride sur le socle cristallin, on ne rencontre pratiquement pas de zones endoréique ou de phénomène de dégradation hydrographique pour des bassins de la taille qui nous intéresse. Ceci s'explique, nous l'avons vu, par une orogénèse active de cette partie du continent sud-américain, qui assure une pente minimum aux rivières.

En conséquence nous ne proposerons pas de facteur correction des écoulements moyens annuels en fonction de la surface du bassin. Il est cependant évident que si l'on constate, sur le terrain, des phénomènes d'endoréisme ou de karst, il faudra alors introduire une correction spécifique.

4.6.6. Validation

Nous nous sommes efforcés de diminuer, le plus possible, la part d'arbitraire dans l'établissement de la méthode de transposition que nous proposons. Il nous faut maintenant la valider.

4.6.6.1 Validation à l'aide des résultats obtenus sur les bassins représentatifs

Nous n'avons pas utilisé les valeurs des écoulements mesurés sur les bassins versants représentatifs pour calculer les coefficients L_{600} des différents types de sol, que nous proposons. Nous pouvons donc utiliser ces bassins représentatifs pour valider, a posteriori, notre méthode.

Nous avons procédé de la manière suivante:

a) Calcul des L_{600} à partir des TS et des caractéristiques physiques des bassins versants représentatifs:

- Sélection des bassins et sous-bassins pour lesquels on dispose d'une estimation chiffrée des différents types de sol (TS) (cette information se trouve dans le chapitre 3).
- Calcul du pourcentage du bassin couvert par chaque TS et estimation de son L_{600} , à l'aide du tableau 4.6.4 ou du tableau A de l'annexe 1.
- Calcul du L_{600} brut moyen de chaque sous-bassin.
- Détermination des facteurs correctifs CA, CV et CL en suivant les règles indiquées au paragraphe 4.6.5 et/ou dans l'annexe 1.
- Calcul final: obtention du L_{600} calculé.

Appliquer la formule: $L_{\text{calculé}} = L_{\text{brut}} \times CA \times CV \times CL$

Les étapes de ce calcul sont résumées dans le tableau 4.6.10.

Tableau 4.6.10 Eléments du calcul de L_{600} des différents sous-bassins.

Bassin de TAUA											
Bassin	L_{600} obs (mm)	Sol-->R+Af L_{600} -->50 (%)	SS (%)	NC (%)	V (%)	PL (%)	L_{600} brut. (mm)	Facteurs correctifs			L_{600} calc. (mm)
			120	37	25	70		CA	CV	CL	
MNO	67,60	10	20	20		50	71,4	1,2	1	0,9	77,1
MOQ	82,36	10	5	70	15		40,6	1,6	1	1,2	78,0
JOF	66,85	10	5	70	15		40,6	1,6	1	1,2	78,0
CAL	82,52	10	10	70	10		45,4	1,6	1	1,2	87,2
LUZ	170,1			80	20		34,6	1,6	2	1,2	132,9
M1T	89,89			100			37	1,6	1,4	1,2	99,5
M2T	79,38			100			37	1,6	1,4	1,2	99,5
M3T	95,50			100			37	1,6	1	1,2	71,0
M4T	32,98				100		25	1,6	1	1,2	48

Bassin de SUME

Bassin	L ₆₀₀	Sol-->Af	PE	NC+NCV	Re	AL	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->90 (%)	15 (%)	32 (%)	37 (%)	25 (%)	brut (mm)	CA	CV	CL	calc. (mm)
GA2	31,43	1	15	73	7	4	30,1	1,3	1	0,9	35,2
JA2	36,95	6	74	19		1	22,8	1,4	1	1	32
UM1	28,01	0		74	19	7	32,4	1,5	0,8	0,8	31,2
UM2	43,47	0		74	19	7	32,4	1,5	0,8	0,8	31,2
MS1	6,73			100			32	1,6	0,5	1,2	30,7
MS2	12,75			100			32	1,6	0,5	1,2	30,7
S31	66,05			100			32	1,6	1,2	1,2	73,7
S32	114,16			100			32	1,6	1,5	1,2	92,2
S33	195,08			100			32	1,6	2	1,2	122,9
S41	66,02			100			32	1,6	1,2	1,2	73,7
S42	79,84			100			32	1,6	1,5	1,2	92,2
S43	162,91			100			32	1,6	2	1,2	122,9

Bassin de RIACHO DO NAVIO

Bassin	L ₆₀₀	Sol -->R+Af	R+NC	PL	RE	NC+REeraso	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->50 %	37 %	70 %	5 %	37 %	brut. %	CA	CV	CL	calc. (mm)
ROS	30,66	38	17		39	6	29,46	1,6	0,9	1	42,4
SAL	47,20	55			38	7	31,99	1,6	0,9	1,1	50,7

Bassin de JUATAMA

Bassin	L ₆₀₀	Sol -->R+Af	PE	SS	PL	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->60 (%)	25 (%)	120 (%)	70 (%)	brut. (%)	CA	CV	CL	calc. (mm)
JU1	67,77	45	22	21	12	66,1	1,2	1	0,8	63,5
JU2	48,62	45	22	21	12	66,1	1,1	1	0,8	58,2

Bassin de IBIBEBA

Bassin	L ₆₀₀	Sol-->C1	C2	L	R	AQ	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->15 (%)	5 (%)	5 (%)	37 (%)	0 (%)	brut. (%)	CA	CV	CL	calc. (mm)
RLG	1,31	27	21	32	17	3	12,99	0,6	1	0,8	6,2
LBA	18,43				100		37	1	1	0,8	29,6
FZI	7,96	69		31			11,9	1	1	0,8	9,5
FZP	13,94	86		14			13,6	1	1	0,8	10,9
LGC	0	23	44	33			7,3	1	1	0,8	5,8

Bassins du G.V.J.

Bassin	L ₆₀₀	Sol-->L	R+PV+V	PVA+AQ	PV+L	A+L	Urb	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->5 (%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	brut. (mm)	CA	CV	CL	calc. (mm)
RBP	39,02	12	13	18	23	30	4	42,89	1	1	1	42,9
RMV	13,99	22	17	12	39	10	0	21,31	1	1	1	21,3

Bassin	L ₆₀₀	Sol -->Re+NC	Rd+Af	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->37 (%)	(%)	brut. (mm)	CA	CV	CL	calc. (mm)
QUI	41,19	43	57	37	1,3	1	0,9	43,3

Acudes des Projets pilotes

Bassin	L ₆₀₀	Sol-->PE	Re	Al	Af	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->15 (%)	(%)	(%)	(%)	brut. (%)	CA	CV	CL	calc. (mm)
MAN	30,1	47	44	7	2	26,88	1,4	1	0,8	30,1

Bassin	L ₆₀₀	Sol-->Re+Af	PE érodé	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs (mm)	L ₆₀₀ -->50 (%)	(%)	brut. (mm)	CA	CV	CL	calc. (mm)
JER	153,42	95	5	49,25	1,6	1	1,2	94,6

Bassin	L ₆₀₀	Sol-->PVE	PV érodé	PV très érodé	L ₆₀₀	Facteurs correctifs			L ₆₀₀
	obs calc.	L ₆₀₀ -->20 (%)	(%)	(%)	brut. (mm)	CA	CV	CL	calc. (mm)
PCO	31,19	33	33	33	28,71	1,6	0,8	1	36,7

Légende:

Af	Affleurement de roche	PL	Planosol
Al	Alluvions	PE, PV, PVA, PVE	Podzolique
AQ	Sable ou Arène quartzeux	RE	Régosol
C1, C2	Cambisol	R, Rd, Re	Lithosolique
L	Latosol	SS	Solonetz
NC	Brun non calcique	Urb	Zone urbanisée
NCV	Brun non calcique verticale	V	Vertisol

b) Calcul des L_{600} des bassins en utilisant directement les valeurs des L_{600} calculées pour chaque UC des cartes de l'EMBRAPA (tableau B de l'annexe 1).

Comme le montre la figure 4.6.6, nous avons calculé le L_{600} des différents bassins représentatifs en utilisant les valeurs proposées pour les différentes Unités de Cartographie pédologiques (UC) qui recouvrent ces bassins, selon les cartes de l'EMBRAPA. Compte tenu de la précision et de l'échelle de ces cartes, nous avons calculé un L_{600} moyen, qui reste constant pour tous les sous-bassins d'un même bassin représentatif.

Ces L_{600} moyens sont ensuite corrigés par les coefficient correctifs C, CA et CL propres à chaque sous-bassin.

c) Comparaison des L_{600} calculées et observées.

Le tableau 4.6.11 et la figure 4.6.7 permettent de comparer les L_{600} calculées aux L_{600} estimées directement pour chaque bassin, que nous avons baptisées L_{600} observées.

Le coefficient de corrélation entre L_{600} observées et calculées avec les TS est de 0,93. Ceci signifie que la méthode de calcul proposée explique 87 % de la variance de l'écoulement. L'équation de la droite de régression est $L_{600} \text{ calc} = 1,32 L_{600} \text{ obs} - 16,0$.

Un même calcul effectué avec la méthode de l'EMBRAPA fournit les résultats suivants :

Le coefficient de corrélation entre L_{600} observées et calculées est de 0,79. Ceci signifie que la méthode de calcul proposée explique 62 % de la variance de l'écoulement. L'équation de la droite de régression est $L_{600} \text{ calc} = 1,02 L_{600} \text{ obs} - 6,7$.

Tableau 4.6.11 Validation de la méthode : comparaison des lames calculées et observées

Bassin	L_{600} observé	L_{600} calculé avec la méthode (TS)	L_{600} calculé avec les cartes de l'EMBRAPA	Bassin	L_{600} observé	L_{600} calculé avec la méthode (TS)	L_{600} calculé avec les cartes de l'EMBRAPA
MNO	68	77	51	S41	66	74	36
MOQ	82	78	51	S42	80	92	36
JOF	67	78	51	S43	163	123	36
CAL	83	87	51	ROS	31	42	38
LUZ	170	133	51	SAL	47	51	38
M1T	90	99	51	JU1	68	63	58.5
M2T	79	99	51	JU2	68	63	58.5
M3T	96	71	51	RLG	1,3	6,2	27
M4T	33	48	51	LBA	18	30	27
GA2	31	35	36	F21	8	9,5	27
JA2	37	32	36	F2P	14	11	27
UM1	28	31	36	LGC	0	5,8	27
UM2	43	31	36	RBP	39	43	27
MS1	7	31	36	RMV	14	21	19
MS2	13	31	36	QUI	41	43	37
S31	66	74	36	MAN	30	30	37
S32	114	92	36	JER	153	95	37
S33	195	123	36	PCO	31	37	25

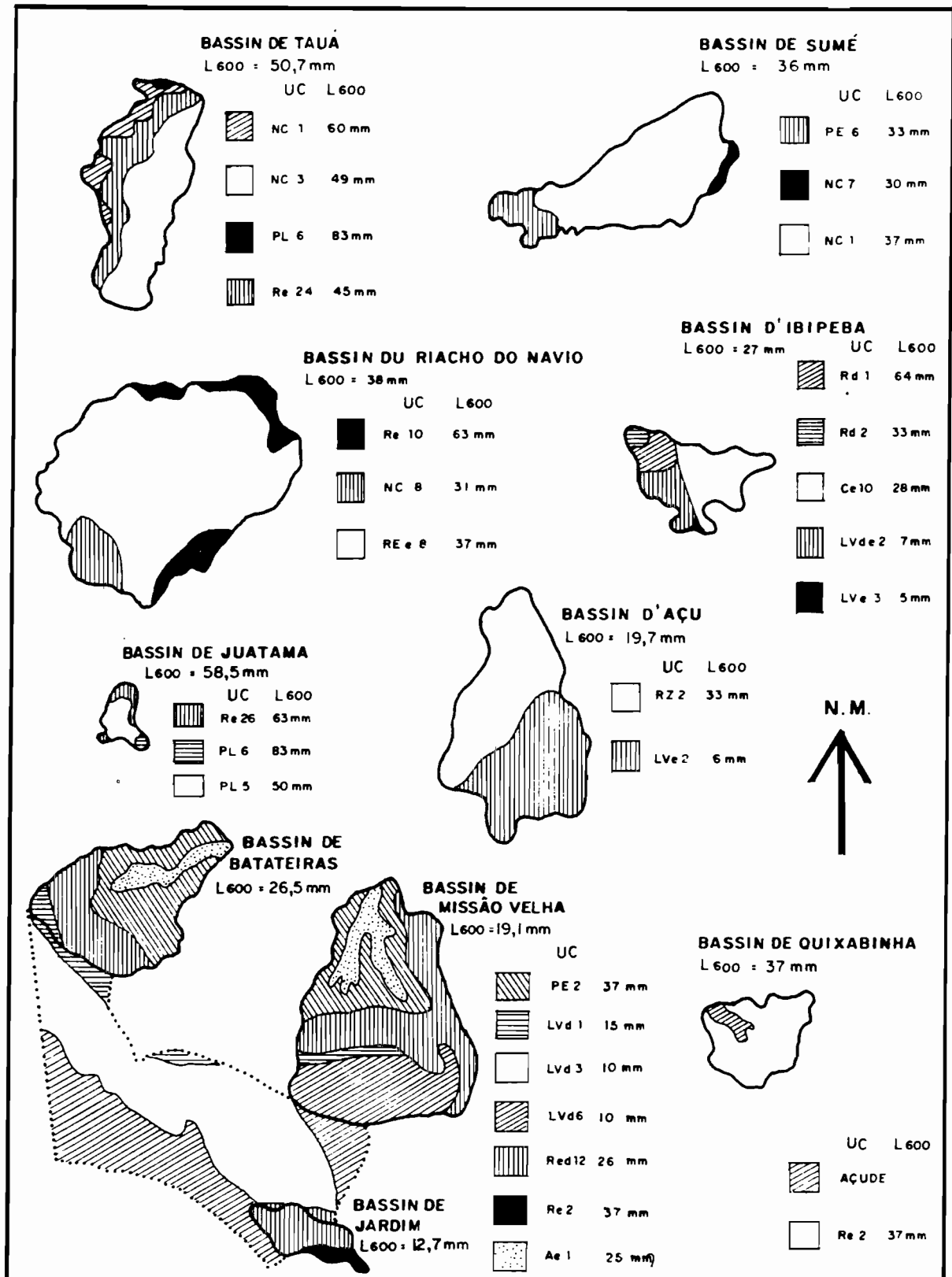
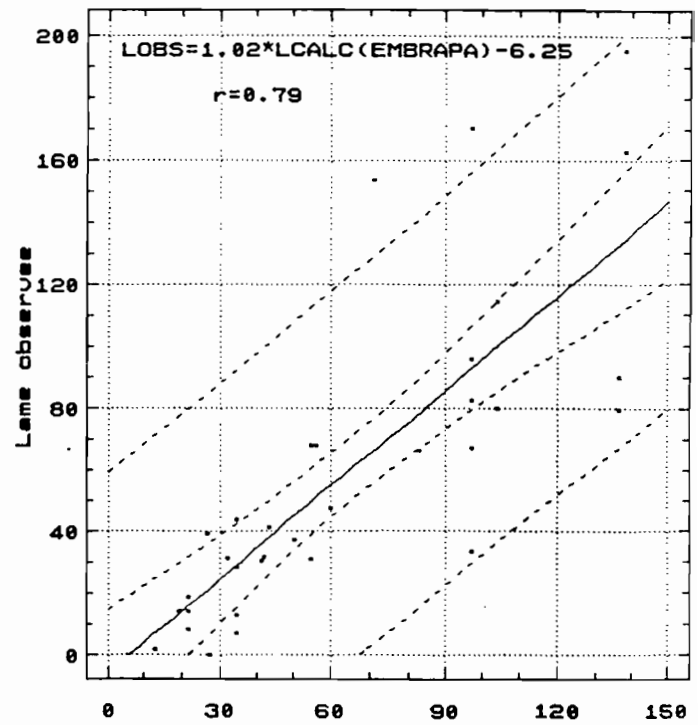
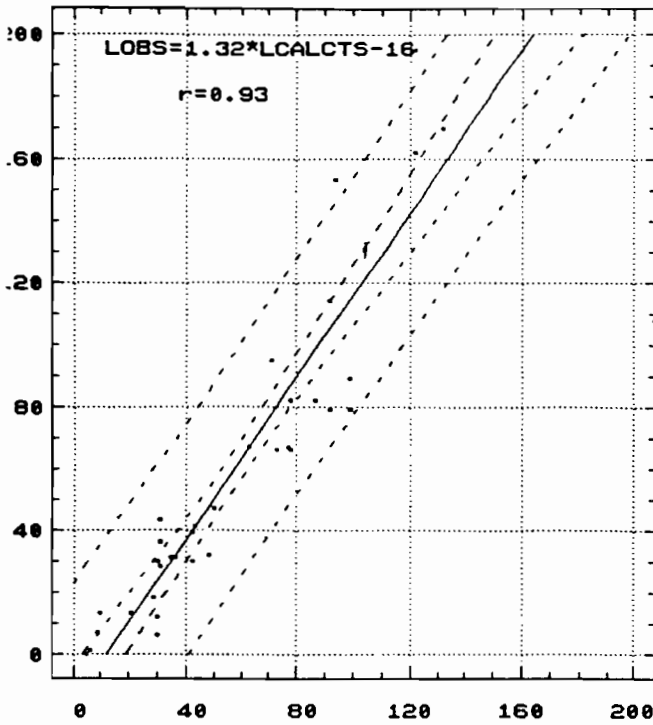


Figure 4.6.6 Calcul des lames écoulées des différents sous-bassins avec les UC des cartes de l'EMBRAPA.



Calcul avec les TS

Calcul avec les UC

Figure 4.6.7 Validation de la méthode : comparaison des lames calculées et observées.

4.6.6.2 Comparaison de la formule SUDENE/ORSTOM avec la formule d'AGUIAR

Il nous faut comparer les formules que nous proposons à celles que F. C. AGUIAR (1940) a établi et qui sont très couramment utilisées dans le Nordeste pour les grands et petits bassins.

F.C. AGUIAR a proposé la formule suivante pour le calcul des lames écoulées:

$$L(p) = U(28,53 H - 112,95 H^2 + 351,91 H^3 - 118,74 H^4)$$

où H est la hauteur de la pluie annuelle moyenne exprimée en mètres et U un coefficient de correction, défini par le tableau suivant:

Tableau 4.6.12 Coefficient de correction U de la formule d'AGUIAR

Type	Bassin Versant	U
1	Petit escarpé et rocheux	1,3 à 1,4
2	Bien accidenté sans dépressions évaporatoires	1,2
3	Moyen	1,0
4	Légèrement accidenté	0,8
5	Idem, avec des dépressions "évaporatoires"	0,7
6	Quasi horizontal, terrain argileux	0,65
7	Idem, terrain variable	0,6
8	Idem, terrain sableux	0,5

Pour la valeur de $U = 1$, qui doit correspondre, dans l'esprit d'AGUIAR, à un bassin standard, nous pouvons calculer les valeurs suivantes de $L(p)$:

Tableau 4.6.13 Lames écoulées en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne calculée avec diverses formules

P annuel (mm)	500	600	700	800	900	1000
Formule d'AGUIAR: L(p) AGUIAR	23	37	57	82	113	149
Formule SUDENE/ORSTOM avec: $L_{600} = 37$	26,7	37	51,4	72	100	139
Formule de la SUDENE 1 avec $L_{600} = 42,7$	30,7	42,7	59	83	115	159

(*) $L(P) = L_{600} \cdot e^{0,0033(P-600)}$

—□— SUD/ORSTOM ($L_{600}=42$) -x- Aguiar (U=1)
 —*— GVJ Cristallin -○— GVJ Sédimentaire

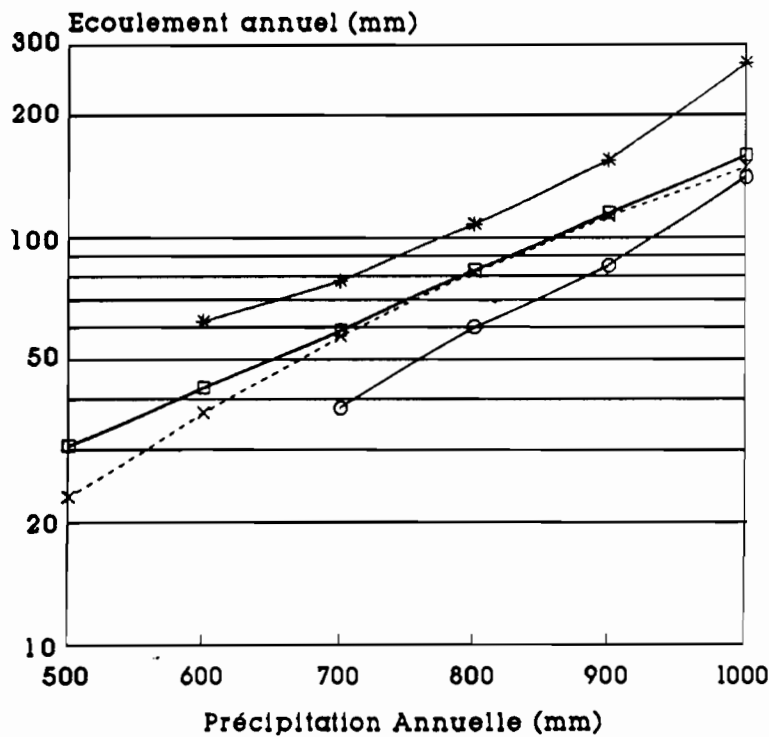


Figure 4.6.8 Comparaison de la formule SUDENE/ORSTOM avec la formule d'AGUIAR

On constate que :

- 1) La valeur moyenne de L_{600} proposée par AGUIAR pour les petits bassins moyens ($U = 1$) qui est de 37 mm, correspond exactement à la valeur de L_{600} du groupe de sol 3, de la classification que nous proposons, qui est la classe de sol la plus fréquente dans les bassins étudiés.
- 2) les différences entre les deux formules (AGUIAR et SUDENE) lorsque la pluviométrie varie entre 500 et 1000 mm ne sont pas très grandes. Ces différences sont encore plus faibles si l'on considère, pour L_{600} , la valeur moyenne calculée sur tous les 15 bassins étudiés qui est de 42,7 mm.
- 3) Les plages de variation du coefficient U de AGUIAR sont bien plus étroites que celles de la L_{600} de la SUDENE. Ceci signifie que la formule d'AGUIAR atténuera les écoulements des bassins très imperméables ou augmentera les écoulements des Bassins qui coulent le moins. Ceci est normal puisque, dans les grands bassins, pour lesquels a été conçue la formule d'AGUIAR, les irrégularités se compensent souvent entre elles.

En conclusion, nous pouvons dire que les deux formules fourniront des résultats globalement comparables. Cependant la formule de la SUDENE/ORSTOM est plus adaptée au cas spécifique des petits bassins, où les variations des comportements sont plus grandes. De plus, la formule SUDENE/ORSTOM peut aussi être utilisée pour de grands bassins, à condition que la pluviométrie ne dépasse pas 1000 mm/an.

La formule de la SUDENE/ORSTOM utilise des Unités de Cartographie pédologique (UC) ou les types de sol (TS) qui sont des critères moins subjectifs et plus faciles à utiliser par des non-spécialistes. Nous y avons joint des formules qui permettent le calcul des lames annuelles et de sécheresses pluriannuelles (années sèches consécutives) de diverses fréquences.

4.6.7. Conclusions sur l'utilisation des données du réseau général

La principale conclusion qui s'impose, en premier lieu, est que **le nombre de bassins du réseau général utilisés pour les calculs d'optimisation est vraiment insuffisant.**

Ceci étant, nous avons établi, grâce à l'information fournie par le réseau général, les bases de la méthode de transposition recherchée. Nous avons en effet réussi à déterminer de manière assez sûre les moyennes régionales²¹ des L_{600} d'un certain nombre de groupe de sols. C'est le cas des sols du groupe 3, c'est à dire la plupart des sols qui produisent des écoulements suffisants pour remplir les barrages. Pour ces sols, la L_{600} moyenne est de 37 mm.

L'incertitude sur la L_{600} des zones possédant des **affleurements rocheux** est, elle, beaucoup plus élevée. Ceci diminuera malheureusement la précision des calculs de dimensionnement dans les régions montagneuses et accidentées qui sont l'une des zones de prédilection pour la construction d'açudes.

Les valeurs élevées proposées pour les **solonetz** ou celles, plus faibles, proposées pour les **vertisols** semblent, elles aussi, régionalement assez sûres.

Les valeurs des autres sous-groupes peuvent n'être que de simples ordres de grandeur basés autant sur notre expérience que sur le résultat des calculs d'optimisation.

Enfin nous avons vérifié que la méthode que nous proposons ne présente pas d'incohérence ou d'incompatibilité grave avec les méthodes hydrologiques utilisées et admises aujourd'hui dans le Nordeste, comme la méthode d'AGUIAR. Notre méthode présente l'avantage de permettre une estimation plus fine et moins subjective des écoulements des petits bassins, pour lesquels elle a été spécifiquement conçue.

21 Les valeurs de L_{600} proposées ne sont, répétons-le, qu'une moyenne régionale de chaque sous-groupe de sol. Elles constituent l'estimation que nous recommandons, quand il n'y a pas d'autre information. Les L_{600} réels des petits bassins peuvent être différents de ces valeurs régionales; les facteurs correctifs ont été introduits pour corriger une partie de ces différences.

CINQUIEME PARTIE

5. TRANSPOSITION DES CARACTERISTIQUES DES CRUES

L'eau, source de bienfaits, apporte aussi la dévastation à qui ne sait s'en protéger.

LES CRUES



5.1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Les aspects théoriques.

Depuis SHERMAN (1932) qui, le premier, a formulé la théorie de l'hydrogramme unitaire, de nombreux auteurs se sont penchés et ont fait part de leur expérience et/ou découvertes sur les liaisons entre volumes, formes et coefficients d'écoulement des crues, en essayant de concevoir ou d'adapter diverses théories sur leur genèse et leur propagation. Plusieurs auteurs s'efforcèrent, parfois de façon polémique, d'améliorer la formulation théorique de ce phénomène :

Après SHERMAN déjà cité, HORTON (1933) proposa une équation simple de répartition entre les parts des précipitations s'infiltrant et ruisselant ; M. ROCHE (1963, 1967 et 1972) apporta plusieurs contributions à la formulation mathématique. Plus récemment IBIZA (1984-85) et MORELL SEYTOUX (1973a et b, 74 et 75) présentèrent de nouvelles formulations théoriques de l'infiltration. L'approche hortonnienne commença à être remise en cause par HEWLET et HIBERT (1967), DUNNE (1978) et MEROT (1988) qui introduisirent la notion de surface de contribution variable, beaucoup plus adaptée aux mécanismes hydrologiques dominants dans les zones humides. FRITSCH (1990) effectua une excellente analyse historique de l'antagonisme et de la complémentarité de ces différentes théories.

Les précipitations.

Plusieurs auteurs approfondirent l'analyse des précipitations qui provoquent les fortes crues.

ROCHE (1963) posa les bases mathématiques du problème de l'abattement des pluies. VUILLAUME (1974) effectua une étude générale de l'abattement des précipitations en Afrique tropicale, en proposant des formules de calcul du coefficient d'abattement en fonction de la taille du bassin, de la période de retour de la pluie et de la zone pluviométrique. Une étude analogue, mais plus restreinte, fût également effectuée dans le Nordeste brésilien par NOUVELOT *et al.* (1979). Pour les bassins situés en France, MICHEL (1990) aborde ce problème par ce qu'il appelle "coefficient d'épicentrage".

CHEVALLIER et LAPETITE (1986) ont mis en évidence les très fortes différences existant en Afrique tropicale et sahélienne entre les pluviométries relevées à plus d'un mètre du sol dans des pluviomètres de type "ASSOCIATION" et celles relevées dans des pluviomètres situés au sol, équipés de dispositifs d'écran supprimant tout effet de turbulence pouvant modifier le volume de pluie capté. A notre connaissance, aucune étude analogue n'a pu être réalisée pour tester les pluviomètres du type "Ville de Paris", dans les conditions aérologiques du Nordeste.

BRUNET-MORET et le CIEH (1985) produisirent une étude synthétique des précipitations en 24h pour l'ensemble de l'Afrique occidentale, document de base indispensable aux études de crues. Nous avons dû réaliser un travail analogue dans le NORDESTE (CADIER *et al.* 1981).

CHEVALLIER (1983) puis SEGUIS (1986, 87) s'efforcèrent de faire le point sur l'influence de l'index des précipitations antérieures (IPA), analogue à l'indice IK que nous utilisons. CHEVALLIER recommande pour de petites parcelles un coefficient K de 0,5 pour sa formule du type $IPA(j) = (IPA(j-1) + P(j-1))e^{-K}$. Ce coefficient K de 0,5 correspondrait à un coefficient CI de 0,60 pour le modèle SUDENE/ORSTOM qui utilise une formulation légèrement différente. Il est normal que le coefficient proposé par CHEVALLIER pour de petites parcelles, pour lesquelles l'eau ne peut être stockée que dans le profil pédologique et où les "effets de surface" prédominent, soit plus faible que celui que nous utilisons, dont la valeur doit intégrer les

nombreuses autres possibilités de stockage hydrique existantes sur de plus grands bassins (flaques, aquifères de toute taille etc.). SEGUI, considère, par ailleurs qu'un coefficient CI de l'ordre de 0,9 est mieux adapté "aux bassins ayant des réactions saisonnières".

LAFFORGUE et CASENAVE (1980) publièrent les premiers résultats relatifs aux mesures sous pluies simulées, recherches qui aboutirent dix ans plus tard, à un ouvrage de référence sur les **états de surface** des sols (CASENAVE et VALENTIN 1989).

Résultats obtenus en Afrique Tropicale : l'oeuvre de J. RODIER.

Il faut réserver une place spéciale dans cette revue bibliographique à **J. RODIER** qui, depuis 1960, assure la promotion et réalise ou participe aux principales publications relatives aux études des crues et des écoulements des petits bassins des zones tropicales africaines, dont il a été souvent le concepteur et l'instigateur. Nous devons tout d'abord signaler l'étude bien connue effectuée par **RODIER et AUVRAY** (1965) qui fournit une **méthode d'évaluation des débits de la crue décennale** des petits bassins, qui nous a souvent servi de référence, ouvrage qui n'a été complété que 20 ans après par PUECH et CHABI-N'GOUI (1984).

Après avoir publié en 1967 un inventaire sur les crues de faible fréquence recensées dans le monde, **J. RODIER** aborde en 1982 les problèmes posés par la transposition des résultats. En 1985, il fait le point sur les caractéristiques des crues des bassins des zones sahéliennes et synthétise, en 1989, les connaissances sur les bassins perméables qui présentent de nombreuses analogies avec les comportements hydrologiques du Nordeste.

Enfin **RIBSTEIN et RODIER** (1989) et **RIBSTEIN** (1989) effectuent une analyse de la forme et de la modélisation des crues du Sahel des petits bassins de moins de 10 km², travail qui réalise, en fait, la synthèse des résultats de plusieurs décennies de travail d'une nombreuse équipe.

Résultats et synthèses en France.

Plusieurs autres équipes ont également abordé, en France, le problème de l'étude des crues. Citons tout d'abord l'excellent et récent ouvrage publié par le **CEMAGREF (C.MICHEL 1989)**, qui présente une méthode pratique, utilisable partout en France. Il simplifie les concepts usuels, en présentant des résultats de manière pratique. La formule de la crue biennale $Q_x = K S^{0,8}$ proposée par cet auteur est très proche de celle que nous avons trouvée pour le Nordeste.

OBERLIN (1980), **SAKOUT et GUILBOT** (1988) et **MALLEMI** (1989) proposent plusieurs méthodes d'estimation régionale des débits maximums et **DUBREUIL** (1988) publie une synthèse des résultats obtenus sur les bassins représentatifs français.

Autres résultats

Citons enfin plusieurs ouvrages de portée moins générale, qui rapportent des chiffres relatifs à un seul bassin ou à de petites zones. Ils nous serviront de référence ou de garde-fou lorsque nous tenterons d'extrapoler nos formules :

- MOLINIER (1981) signale des coefficients d'écoulement de crue de près de 100 % sur le bassin de la Comba au CONGO.
- ALBERGEL (1988) propose pour une parcelle de sol nu recouvert d'une pellicule (GAGARA) une équation de lame ruisselée $Lr = 0,96P - 2,6$ qui conduit également à des coefficients d'écoulement proches de 100%. Cet auteur met également en évidence, ces dernières années, du ruissellement au Sahel due à la dégradation de la végétation propice à l'apparition d'effets dits de "surface".
- THEBE et PONTANIER (1989) effectuent, sur un bassin du Nord Cameroun, une tentative de correction des résultats en fonction de la taille du bassin.
- Mentionnons enfin l'excellente et fine analyse des mécanismes hydrologiques du bassin de savane tropicale de BORO-BOROTOU, effectuée par CHEVALLIER (1988) et, plus près de nous dans le "Nordeste", l'étude des mécanismes des transferts d'eau et de matière, effectuée par MOLINIER *et al.* (1989a et b) sur le bassin expérimental de SUME, qui met en évidence toute la complexité des mécanismes, tout en proposant quelques équations pratiques.

Méthodes de calcul de crues utilisées dans le Nordeste brésilien.

Les études hydrologiques **spécifiques au "Nordeste"** permettant le calcul des crues des petits bassins sont rares. Les hydrologues y utilisent souvent la méthode proposée par AGUIAR (1940), bien souvent hors de son domaine de validité, quand il s'agit de petits bassins. Ils vérifient ensuite souvent leurs calculs avec des méthodes d'origine américaine telle que la **méthode rationnelle**, $Q = C.I.A^1$ ou parfois des équations proposées par BENSON, CRAGER, FANNING, SCIMENI, ISZANSKI, TETTIS, FULLER ou HORTON.

La réalisation d'une étude spécifique des caractéristiques des crues des petits bassins versants du Nordeste s'avère urgente et comblera une lacune évidente des connaissances régionales.

¹Qui suppose que le débit de pointe est proportionnel à l'intensité I de la pluie et à la surface A du bassin.

5.2 METHODE, OBJECTIFS ET STRATEGIE

La méthode et les modèles employés pour le calcul des lames annuelles de diverses fréquences ne sont pas utilisables pour le calcul des paramètres des crues. Le pas de temps journalier du modèle de simulation SUDENE/ORSTOM ne permet pas, en effet, de reconstituer correctement les variations rapides des débits des crues. La méthode que nous avons employée ensuite pour quantifier les lames annuelles, en utilisant les modules annuels des stations hydrométriques du réseau général, paraît encore plus inadaptée.

Il faudra donc imaginer une méthode spécifique qui devra exploiter au maximum les résultats obtenus sur les petits bassins versants représentatifs du Nordeste brésilien. L'information acquise sur ces bassins constitue, en effet, l'essentiel de l'information disponible concernant les crues des petites rivières de cette région.

Les résultats que nous devrions fournir devront être, rappelons-le, directement utilisables pour un "*Manuel pratique de construction de petits barrages*". Il ne peut être question de proposer une méthode restrictive qui ne traite pas tous les cas possibles. L'utilisateur du manuel se sentirait frustré et construirait son barrage de toutes les façons en utilisant une autre méthode de dimensionnement ou en n'en utilisant pas du tout, comme cela se passe trop souvent ! C'est dans cet esprit que nous avons usé, faute de mieux, de certains procédés empiriques et parfois non validés dans le Nordeste. Nous nous référons, par exemple, aux formules concernant les bassins de moins de 5 km², ceux des zones sédimentaires, ou aux facteurs correctifs de crues.

Objectifs: Quels paramètres rechercher ?

Deux caractéristiques des crues intéressent au premier chef les aménageurs :

- Le débit de pointe (Q_x)
- La lame (L_e) ou le volume (V_e) écoulé

Ne disposant pas des moyens et des données nécessaires, il serait illusoire et nous ne tenterons pas de reproduire ou d'adapter les nombreuses études menées sur le continent africain, qui traitent de l'analyse et de la modélisation fine des mécanismes. Nous nous limiterons à une étude relativement sommaire² des données disponibles en restant au niveau des paramètres globaux des crues. Notre objectif est l'estimation des deux caractéristiques des crues suivantes :

- La lame écoulée (L_e)
- Le coefficient (K_x) que nous allons définir.

Ces deux caractéristiques permettent, nous le verrons, d'estimer simplement le débit de pointe et le volume des crues.

²La précision que nous atteindrons sera, bien sûr, limitée. Nos résultats devront être considérés comme une première ébauche de ce qu'il faudrait faire.

Le coefficient K_x

Le débit Q_x et le volume V_e ne sont pas indépendants. Ils sont liés par ce que nous appelons la fonction d'étalement de la crue. Cette fonction est définie par le temps pendant lequel le volume de la crue s'écoule et par la loi de distribution des débits en fonction du temps.

Nous représentons cette fonction d'étalement par un coefficient global appelé K_x défini, pour une crue donnée, comme étant le **débit de pointe correspondant à une lame écoulée de 1 mm**. K_x s'exprime en m^3/s .

De par sa définition, ce coefficient K_x permet de relier Q_x à Le par la formule³ :

$$Q_x(m^3/s) = K_x * Le(mm)$$

Cette formule, très simple, constitue l'une des bases de notre méthode. Elle peut encore s'écrire :

$$Q_x(m^3/s) = K_x * V_e(m^3) / (1000 * S(km^2))$$

Ce coefficient K_x a les dimensions d'une surface divisée par un temps et est lié au temps caractéristique θ défini par IBIZA (1987) par la formule $K_x = 1000 * S / \theta$

K_x peut être encore calculé par $K_x = S \times \alpha / (3,6 * T_b)$ ou encore $K_x = S * Q_x / (3,6 * V_e)$.

- S étant la surface du bassin, en km^2

- Q_x le débit de pointe de la crue, en m^3/s

- α le coefficient de forme de la crue, défini par ($\alpha = Q_x / Q_m$), Q_m étant le débit ruisselé moyen de l'hydrogramme, pendant le temps de base T_b , exprimé en heures.

La dernière formule montre que K_x peut être calculé uniquement à partir de Q_x et de V_e , donc sans faire intervenir le temps de base T_b et le coefficient α dont la détermination est délicate et subjective.

Cette dernière proposition est très importante, car elle montre que K_x est l'une des manières simples d'exprimer le temps d'écoulement des crues, qui n'exige qu'un nombre réduit d'hypothèses sur leur forme : le volume et le débit de pointe suffisent. Il faudra tout de même délimiter le début et la fin de la crue, puis soustraire éventuellement le débit de base pour calculer ce volume, mais ce sont les seules opérations du processus qui fassent appel à l'interprétation et qui sont donc, forcément, un peu arbitraires.

En outre K_x est lié de façon directe aux deux caractéristiques des crues qui intéressent les aménageurs, raison supplémentaire de son choix.

La surface du bassin, le facteur explicatif principal des débits de crue :

La surface du bassin est, à l'évidence, le facteur explicatif principal des temps caractéristiques des crues et donc des coefficients K_x .

Dans le but d'obtenir la formule finale la plus simple possible, nous chercherons à exprimer les variations des autres paramètres des crues et en particulier celles des lames écoulées en fonction de la surface. La surface du bassin jouera ainsi le rôle d'un dénominateur commun entre les divers phénomènes de nature physique, hydraulique ou géomorphologique qui régissent la genèse des crues.

³Nous n'avons fait, à ce stade, aucune hypothèse sur la forme de la crue. Cette formule s'applique donc à des crues de forme quelconque ainsi qu'aux hydrogrammes unitaires.

5.3 INFORMATION DISPONIBLE

5.3.1 Résumé des caractéristiques des crues des petits bassins du Nordeste :

Nous avons reporté dans le tableau 5.1 les principales caractéristiques des crues observées sur 19 petits bassins versants du Nordeste brésilien. Cet échantillon de 19 bassins est composé de 17 des 42 bassins utilisés pour l'étude des écoulements annuels⁴. Nous avons pu y adjoindre deux bassins supplémentaires, en utilisant les paramètres des crues extraits des rapports publiés lors de l'étude du Val du Jaguaribe : le bassin du rio GRANJEIRO et celui du BATATEIRAS à CRATO.

Nous avons déterminé, pour chaque bassin, deux ensembles de valeurs caractéristiques des crues :

- le premier, relatif à la moyenne des 10 plus fortes crues observées sur chaque bassin, est symbolisé par le suffixe "moy" dans les tableaux et graphiques de ce chapitre.
- Le second, relatif aux caractéristiques de l'hydrogramme unitaire est symbolisé par le suffixe "unit".

Nous avons indiqué dans ce tableau :

- la valeur indicative de la lame décennale X_{10} calculée avec le modèle SUDENE/ORSTOM.
- Les temps de base T_b et de montée T_s .
- Les coefficients $K_x = S * \alpha / (3,6 * T_b)$ et α , qui est le coefficient de forme de l'hydrogramme défini au paragraphe précédent.
- K_x correspond, rappelons le, au débit maximum d'un hydrogramme de 1 mm de lame écoulée.
- Le débit Q_{10} de la crue décennale estimé, dans le rapport final de chaque bassin, et correspond aux valeurs que nous avons publiées au chapitre 3.
- Le rapport : $Q_{\text{projet}} / (2 * Q_{10})$ qui permet de vérifier la formule de transposition que nous allons proposer, Q_{projet} étant calculée par les formules de transposition que nous proposons aux paragraphes 5.4.1 et 5.4.2.

⁴Les caractéristiques des crues des 25 autres bassins n'ont pas pu être étudiées, soit parce que le dispositif de mesure était réduit à une batterie d'échelle sur un açude, dépourvu de limnigraphe et donc incapable d'enregistrer la forme des crues, soit parce qu'il s'agissait de micro-bassins dont les temps d'écoulement dépendent essentiellement de la pluie et ne correspondent donc pas à notre approche du problème.

Tableau 5.1 Caractéristiques des crues des bassins versants représentatifs du Nordeste brésilien

Nom	Surface (km ²)	Lame decen. (mm)	Kx moy.	Tbase moy. (h)	α moy.	T.montée moy. (h)	Kx unit	Tbase unit (h)	α unit	T.montée unit (h)	Q ₁₀	Qprojet /2*Q ₁₀
PGI	194.0	26.0	3.44	49.98	2.77	14.76	6.67	20.00	2.66	4.00	90	2.97
MNO	19.0	56.0	1.27	13.10	2.98	2.87	1.84	6.00	2.10	2.00	71	0.97
CAL	0.77	37.0	0.20	3.98	3.09	1.37	0.30	2.00	2.78	0.65	7.4	0.93
GAN	137.0	19.0	6.37	16.24	2.52	3.63	15.00	8.00	3.00	2.50	121	1.79
JAT	26.8	26.0	2.22	10.78	3.02	2.27	3.00	5.50	2.60	1.60	58	1.45
UMB	10.7	32.0	0.81	9.77	2.34	2.96	1.60	5.00	2.60	1.10	26	1.90
MAT	468.0	12.0	19.69	21.05	2.99	4.55	26.70	13.00	2.65	4.00	236	1.87
OSB	45.2	25.0	3.55	13.40	3.62	2.39	5.50	9.00	3.90	1.00	89	1.28
SAL	15.6	27.0	1.47	14.64	3.70	2.36	2.55	6.25	3.60	0.75	40	1.54
JUA	19.2	33.0	1.88	9.78	3.06	3.87	2.18	6.00	2.45	1.00	62	1.12
LGR*	321.0	1.0	7.15	33.00	2.41	12.36	10.40	20.00	2.33	7.00	7	50.77
LBA*	19.1	2.0	4.42	3.01	2.43	1.06	12.00	1.00	2.26	0.33	9	7.69
FZI*	46.8	12.0	4.62	10.25	2.80	3.91	11.70	3.33	3.00	0.67	55	1.40
FZP*	14.8	15.0	3.20	5.35	3.12	2.09	5.90	2.17	3.11	0.50	48	1.24
BPC*	198.0	13.0	2.68	64.75	2.81	12.29	3.33	40.00	2.42	3.50	35	7.67
MVE*	266.0	4.0	14.29	17.21	3.21	5.75	11.50	15.00	2.33	4.50	57	3.70
QUI*	83.0	20.0	7.10	9.64	2.92	0.92	10.90	5.00	2.36	1.00	142	1.14
GRA*	18.0	-	5.48	2.82	3.01	1.10	5.00	2.75	2.75	1.00	-	-
BCR*	29.5	-	6.75	3.37	2.67	0.70	12.00	1.67	2.44	0.50	-	-

* bassin situé dans une zone sédimentaire.

Tous les bassins sauf celui de CALDEIRAO ont une surface comprise entre 10 et 500 km².

5.3.2 Les gammes de surface : les temps de concentration.

La théorie de l'hydrogramme unitaire, qui sous-tend notre raisonnement, introduit, pour un bassin donné, une limite à la durée de la pluie, en-dessous de laquelle la durée du ruissellement ne varie plus. Tous les hydrogrammes présentent alors des formes affines et donc des temps de montée et de base identique. On dit alors que les pluies et les crues sont unitaires. Cette durée limite de la pluie au delà de laquelle les crues ne sont plus unitaires est liée au temps de concentration du bassin. Le temps de concentration est le temps mis par le ruissellement en provenance de la partie la plus éloignée du bassin pour parvenir à l'exutoire.

Le temps de concentration peut être calculé, par exemple, par la formule proposée par la California Highways and Public Works :

$$T_c = 57 (L^3/H)^{0,385}$$

où L en km, est la longueur du talweg le plus long ;
H en m, est la dénivelée du bassin ;
Tc en minutes, est le temps de concentration.

Pour fixer les idées, nous avons calculé dans le tableau suivant des temps de concentration correspondants à plusieurs hypothèses :

Tableau 5.2 Valeurs du temps de concentration en minutes calculées selon diverses hypothèses sur la morphologie du bassin

Surface du bassin	10 km ²	5 km ²	1 km ²	0,1 km ²
Relief fort/Bassin compact	41min	31	14	6,4
Relief fort/Bassin allongé	92	69	32	14,3
Relief moyen/Bassin compact	86	62	27	9,2
Relief moyen/Bassin allongé	191	137	59	20,4

Ce tableau a été établi avec les hypothèses suivantes, effectuées pour représenter les situations les plus courantes rencontrées dans le Nordeste :

Hypothèses sur la forme du bassin :

Bassin compact : $L = 1,4 (S)^{0,5}$

Bassin allongé : $L = 2,8 (S)^{0,5}$

Hypothèses sur les valeurs de la dénivelée H (m)

SURFACE	10 km ²	5 km ²	1 km ²	0,1 km ²
H relief fort	200 m	150 m	100	25
H relief moyen	30 m	25	20	10

En analysant les hauteurs et les intensités des fortes pluies présentées au chapitre.1, on observe que 56 % du total des fortes pluies tombe en moins d'une heure et 75 % en moins de deux heures. Ceci nous amène à penser que la théorie de l'hydrogramme unitaire ne peut plus s'appliquer à des bassins dont le temps de concentration est supérieur à une ou deux heures. Le tableau 5.2 permet de situer cette limite vers 5 ou 10 km².

Nous adopterons 5 km² comme limite de taille de bassin, en dessous de laquelle les hydrogrammes des crues provoquées par les plus fortes pluies ne seront certainement plus unitaires au sens de SHERMAN.

5.4 FORMULES PROPOSEES POUR LA TRANSPOSITION DES CRUES POUR LES ZONES CRISTALLINES

5.4.1 Surfaces de bassins comprises entre 5 et 500 km²

Dans cette gamme de surface la théorie de l'hydrogramme unitaire est donc, en principe, applicable. Nous chercherons tout d'abord à établir une formule de transposition pour les bassins du cristallin qui sont les plus dangereux et dont les paramètres (débits, coefficients Kx, surfaces des bassins etc.) sont liés par des relations relativement cohérentes et faciles à interpréter.

5.4.1.1 Variations de Kx en fonction de la surface

La figure 5.1 montre la relation entre Kx et la surface S du bassin pour la zone cristalline.

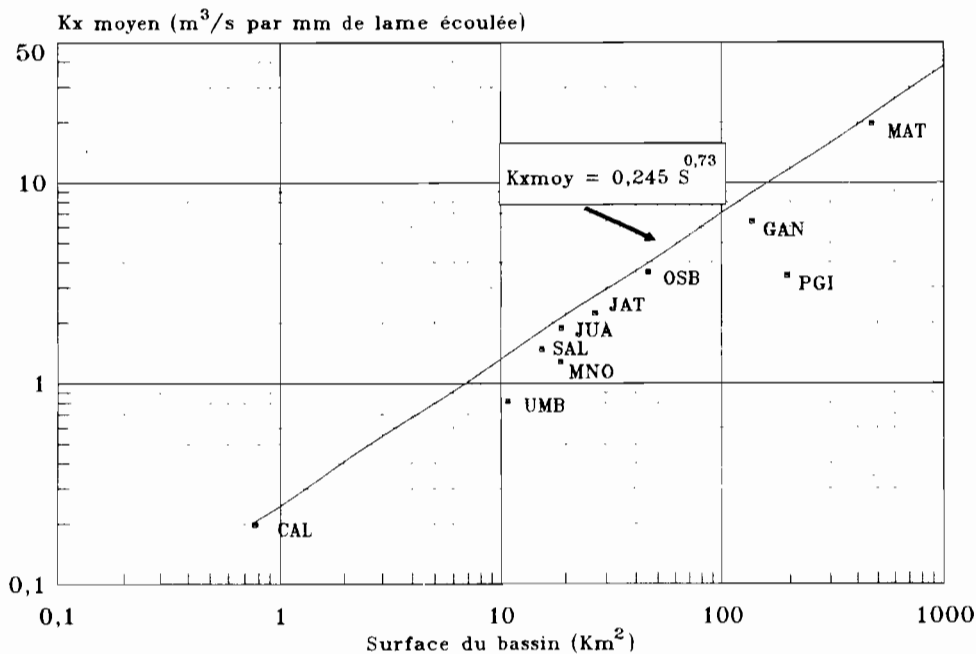


Figure 5.1 Relation entre Kx et la surface S du bassin de la zone cristalline.

Pour les bassins cristallins, l'enveloppe supérieure de la relation $Kx = f(S)$ est définie par la relation :

$$Kx_{moy} = 0,245 S^{0,73} \quad (1)$$

5.4.1.2 Variations de la lame de la crue décennale en fonction de la surface

On peut ajuster, à l'aide de la figure 5.2, la relation suivante entre la lame et la surface des bassins des régions cristallines:

$$L = 51 S^{-0,15} \quad (2)$$

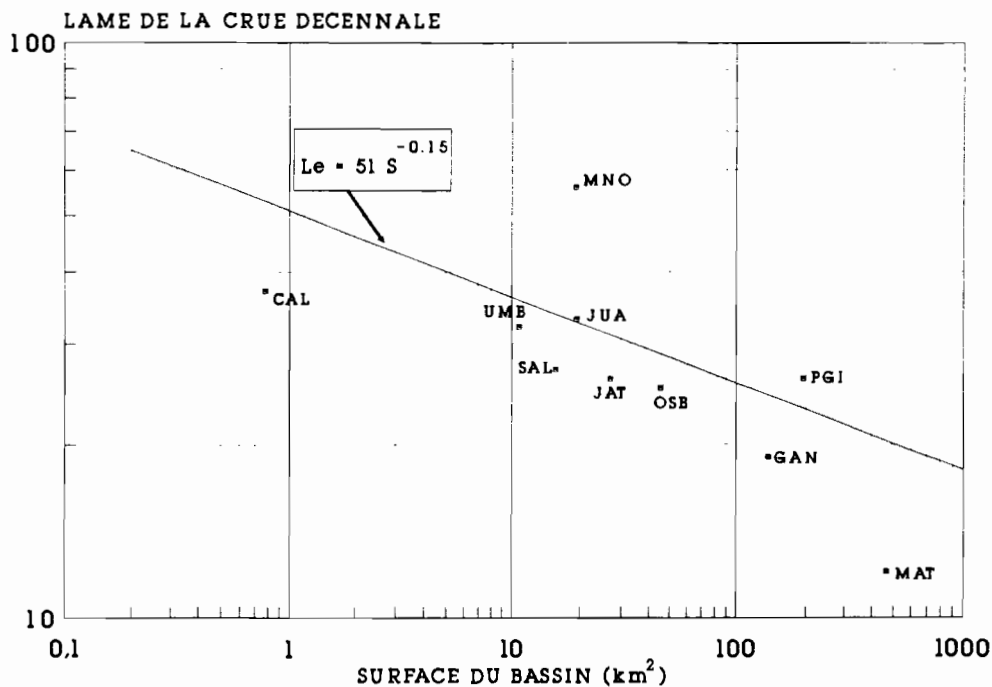


Figure 5.2 Relation entre la lame de la crue décennale Le et la surface S des bassins

La lame écoulee décennale moyenne des petits bassins les plus dangereux de 5 km² peut ainsi être estimée à 40 mm. Pour 500 km² cette estimation n'est plus que 20 mm.

Ces valeurs de 40 et de 20 mm peuvent être confirmées à partir des éléments suivants⁵ :

■ **Confirmation de la lame de 40 mm pour les bassins de 5 km² :**

- * Les variations de la pluie en 24h de fréquence décennale dans la grande zone climatique Sertão sont faibles. Cette pluie décennale est de l'ordre de 105 mm. Cette "quasi-constance" de la pluie décennale, que l'on ne retrouve pas en Afrique, a une grande importance. En effet c'est elle qui nous a incité à proposer une seule formule pour toute la zone Sertão.
- * La lame décennale de 40 mm que nous proposons pour les bassins de 5 km² est compatible avec les plus fortes valeurs du tableau 5.1 et avec le calcul que l'on pourrait effectuer avec les hyperboles des modèles des bassins estimés les plus "dangereux". Une lame écoulee de 40 mm correspondrait, par exemple, à l'écoulement provoqué par une pluie décennale de 105 mm que calculerait une hyperbole du modèle SUDENE/ORSTOM de pente $P=0,40$ et de $X_0=5$ mm ou encore de pente $P=0,45$ et de $X_0=16$ mm.

La courbe enveloppe des Kx_{moy} des bassins cristallins que nous venons de définir a déjà été calculée avec une marge de sécurité d'environ 30 %, par rapport à la moyenne des bassins qui ont les temps de base les plus courts et qui sont les plus dangereux. Cette marge nous paraît suffisante et il serait exagéré d'en prendre une deuxième pour l'estimation des lames écoulees.

⁵ Les arguments et justificatifs que nous avançons peuvent paraître discutables ou insuffisamment étayés. Nous en sommes bien conscients et le déplorons. Nous n'avons malheureusement rien de plus conséquent à proposer. Nous avons cherché dans ces lignes à analyser notre démarche pour mieux situer et expliquer les raisonnements et cerner les hypothèses empiriques que nous avons dû adopter.

■ Confirmation de la lame de 20 mm proposée pour les bassins de 500 km².

- * Le coefficient d'abattement réduit les pluies de 25 à 35 % selon les auteurs. Ceci entraîne, nous l'avons vu, une baisse de 12 à 14 mm des écoulements.
- * Un grand bassin sera forcément composé de certaines parties, des zones alluviales par exemple, qui ruisselleront moins et nous permettront de diminuer la marge de sécurité que nous avons prise pour cinq km². Cette diminution supplémentaire est estimée arbitrairement entre 5 et 10 mm.
- * Il est de plus souhaitable, que la formule que nous proposerons, soit compatible avec la formule d'AGUIAR, établie pour les bassins de taille supérieure à 500 km².

5.4.1.3 Formule de calcul du débit de la crue de projet

La combinaison des équations (1) et (2) permet d'établir l'équation que nous proposons pour calculer le débit de la crue de projet : (Q_{proj}).

Nous définirons, en accord avec RIBSTEIN (1989), le débit de la crue de projet comme étant le double du débit décennal, ce qui correspond, selon nos estimations, à une période de retour de l'ordre de 100 à 200 ans.

$$Q_{proj} = Kx_{moy} * \text{Lame crue projet} = 2 * Kx_{moy} * \text{Lame crue décennale}$$

$$Q_{proj} = 2 * (0,245 * S^{0,73} * 51 * S^{-0,15}) = 25 * S^{0,58}$$

Ce qui donne finalement :

$$Q_{proj} = 25 * S^{0,58} \quad (3)$$

Pour le calcul du débit décennal, nous avons utilisé la valeur Kx_{moy} au lieu de Kx_{unit} , puisque le débit calculé avec la lame de période de retour de 1/10, aurait évidemment une période de retour très supérieure à 10 ans, si l'on avait effectué les calculs avec un hydrogramme de forme unitaire !

5.4.2 Surfaces de bassins comprises entre 0,1 et 5 km²

En dessous d'une certaine surface, la théorie de l'hydrogramme unitaire, qui a été utilisée pour établir la formule de la gamme de surfaces intermédiaires de 5 à 500 km², n'est plus applicable, puisque la durée de la pluie est supérieure au temps de concentration du bassin, ce qui signifie que les fortes pluies continueront à tomber durant la crue.

Ne disposant d'aucune information directe, pour cette gamme de surface, mis à part celle fournie par le bassin du CALDEIRAO, nous avons tenté d'établir une formule du type $Q_x = K * S^a$, en utilisant la formule classique appelée rationnelle : $Q = CIA$, qui s'écrit $Q = CIS$, puisque nous utilisons le symbole S et non A pour représenter la surface du bassin. En tenant compte des unités employées, cette formule s'écrit :

$$Q_{proj} = C * I * S / 3,6$$

C est un coefficient arbitraire, que nous avons supposé égal à 0,6 pour 0,1 km² et à 0,5 pour 5 km². Le choix de ces valeurs pour C revient à supposer que les débits centennaux à l'exutoire représenteront respectivement 50 et 60 % des intensités de même fréquence.

I est l'intensité de la précipitation de fréquence centennale dont la durée correspond au temps de concentration Tc présenté dans le tableau 5.2 Nous avons repris les fréquences centennales d'intensité indiquées au chapitre 1.

Nous avons calculé le débit de la crue de projet pour deux surfaces de 0,1 et 5 km² :

SURFACE	0,1 km ²	5 km ²
Tc moyen	10 min'	45 min
Pluie durant Tc	27 mm	65 mm
I	162 mm/h	87 mm/h
C	0,6	0,5
Q	2,7 m ³ /s	60 m ³ /s

En calculant la fonction puissance qui passe par ces deux points, on obtient finalement la formule suivante qui correspond aux petits bassins les plus dangereux :

$$Q_{proj} = 17 * S^{0,8} \quad (4)$$

Notons que, dans le cas des bassins de surface inférieure à 5km², le débit de la crue de projet que nous proposons n'est plus égal au double du débit décennal. Cela vient du mode de calcul différent qui suppose que les débits sont proportionnels aux intensités de pluie de même période de retour. Or les intensités centennales sont inférieures au double de leurs homologues décennales...

5.4.3 Surfaces supérieures à 500 km²

Pour des surfaces supérieures à 500 km² nous conseillons d'utiliser la formule établie par F.G. d'AGUIAR dont c'est le domaine de validité. Rappelons sa formulation et son mode d'utilisation :

$$Q_{\text{projet}} = \frac{1.150 * S}{(LC)^{0,5} * (120 + KLC)} \quad (\text{en m}^3/\text{s})$$

où S = surface du bassin versant, en km²;

L = longueur en km du cours d'eau le plus long;

K, C = coefficients qui dépendent du type de bassin définis par le tableau suivant.

Tableau 5.3 Coefficients K et C de la formule d'AGUIAR de calcul des crues

MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT	TYPE	COEFFICIENTS	
		K	C
Petit bassin escarpé et rocheux	1	0,10	0,85
Bassin bien accidenté, sans dépression évaporatoire	2	0,15	0,95
Moyenne	3	0,20	1,00
Légèrement accidenté	4	0,30	1,05
Légèrement accidenté avec une dépression évaporatoire	5	0,40	1,15
Quasi-horizontale avec sols argileux	6	0,65	1,30
Quasi-horizontale avec sols intermédiaires	7	1,00	1,45
Quasi-horizontale avec sols sableux	8	2,50	1,60

Nous ne pouvons plus utiliser la formule proposée $Q = 25.S^{0,58}$ car le raisonnement et les hypothèses avec lesquels nous l'avons calculée ne sont plus valides au-delà de 500 km², en effet :

a) Au dessus de 500 km² les temps de base des crues sont souvent supérieurs à 24 h. Pour cette raison, les fortes crues risquent, trop souvent, d'être provoquées par des épisodes pluvieux complexes, composés de plusieurs pluies convectives survenant des jours différents. Ceci rentre en contradiction avec les hypothèses adoptées pour utiliser Kx et sur les valeurs de la précipitation centennale utilisées pour le calcul des lames de crue. Ainsi, la valeur de 105mm que nous avons utilisée, provient d'ajustements statistiques sur les séries des pluies en 24h. Elle n'est donc plus utilisable pour calculer la lame écoulée, puisqu'il faudrait analyser les pluies de durée supérieure à 24 h.

b) Au dessus de 500 km², l'homogénéité spatiale des pluies convectives diminue considérablement. La probabilité de voir les différentes parties d'un bassin atteintes par plus d'un système nuageux convectif (ou cumulo-nimbus) augmente beaucoup.

5.4.4 Relation entre les temps caractéristiques des hydrogrammes

La figure 5.3 et le tableau suivant montrent la relation du temps de base (Tmoy) des fortes crues en fonction de la surface.

Temps de base moyen des crues en fonction de la surface								
Surface (km ²)	5km ²	10	20	50	100	200	500	1000
Temps de base(h)	7	8,5	10	13,5	16	18	22	25

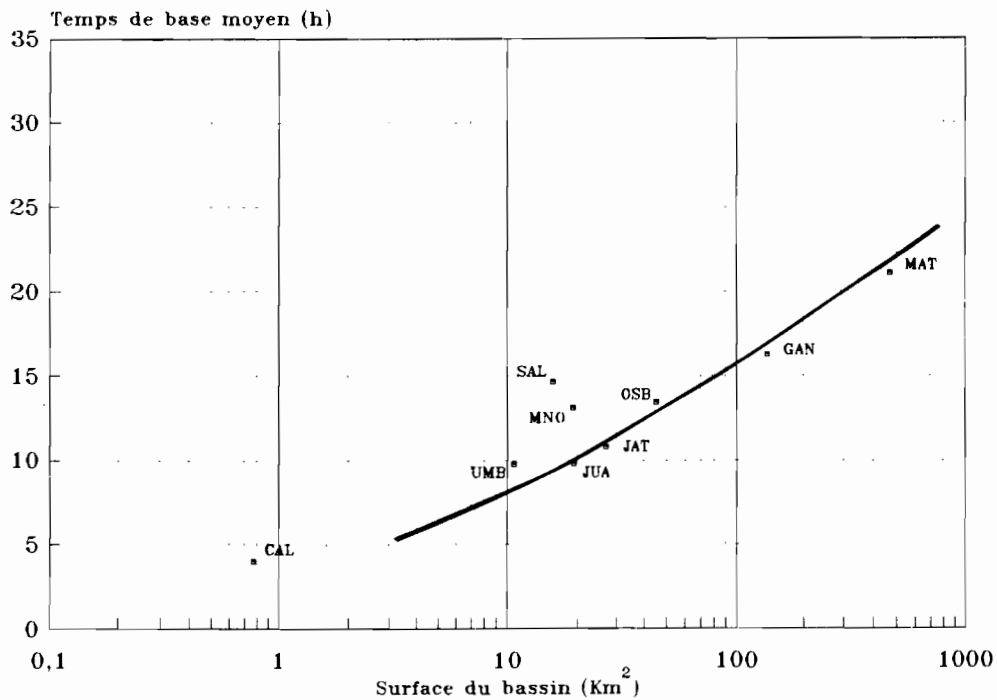


Figure 5.3 Temps de base moyen, en fonction de la surface. Bassins des zones cristallines

Les graphiques suivants et le tableau 5.1 permettent d'établir les relations suivantes :

Kx (sédimentaire)	= 1,6 Kx (cristallin)
Kx (unit)	= 1,6 Kx (moy)
Tb (moy)	= 1,8 Tb (unit)
Ts (moy) varie en général entre 1,3 Ts(unit) et 2,5 Ts(unit)	
Ts (moy) varie, généralement, entre 0,17 Tb(moy) et 0,36 Tb(moy)	

Ces relations permettront de comparer les temps caractéristiques des crues obtenus à partir des BVR du Nordeste avec ceux établis par d'autres auteurs, pour d'autres régions du monde. Elles seront aussi nécessaires pour certains calculs comme celui de l'amortissement des crues dans les retenues, calculs qui utilisent les temps de montée ou de base de l'hydrogramme.

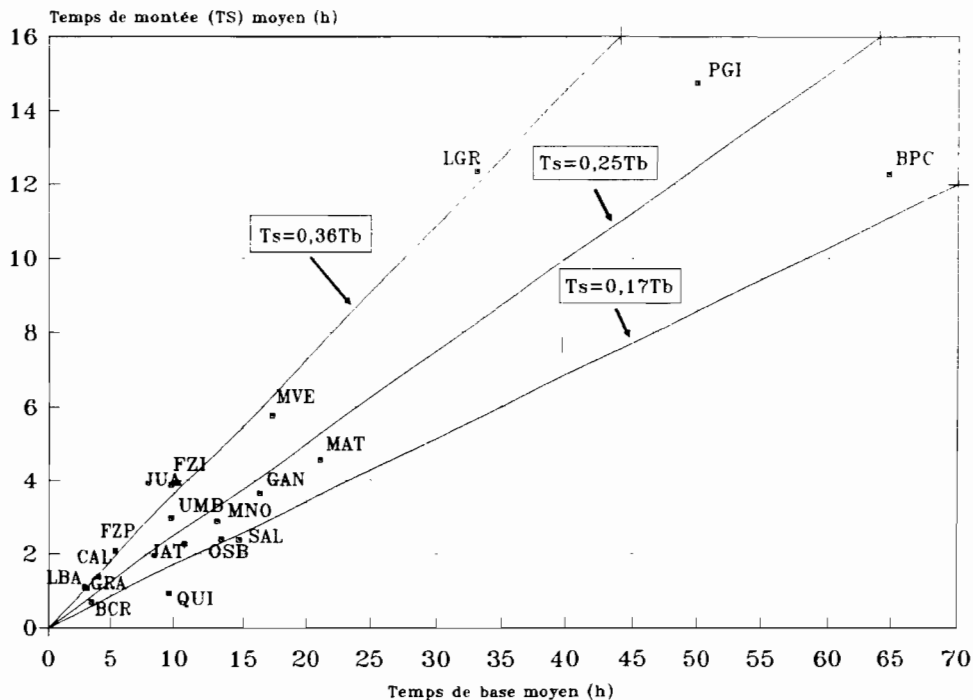


Figure 5.4 Temps de montée moyen en fonction du temps de base moyen. Toutes zones

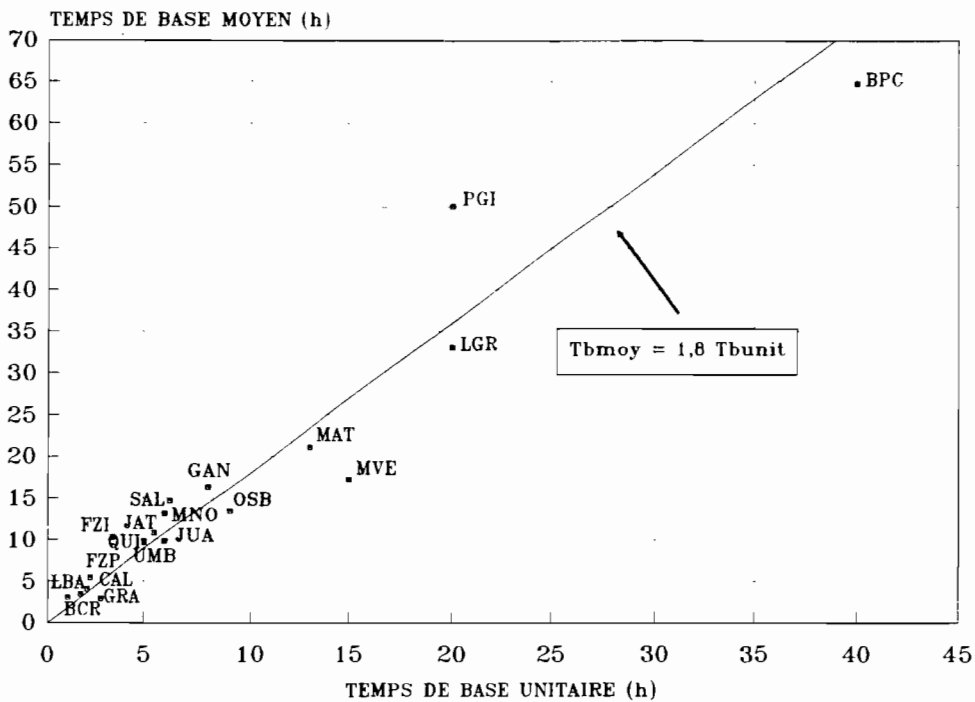


Figure 5.5 Temps de base moyen en fonction du temps de base unitaire. Toutes zones

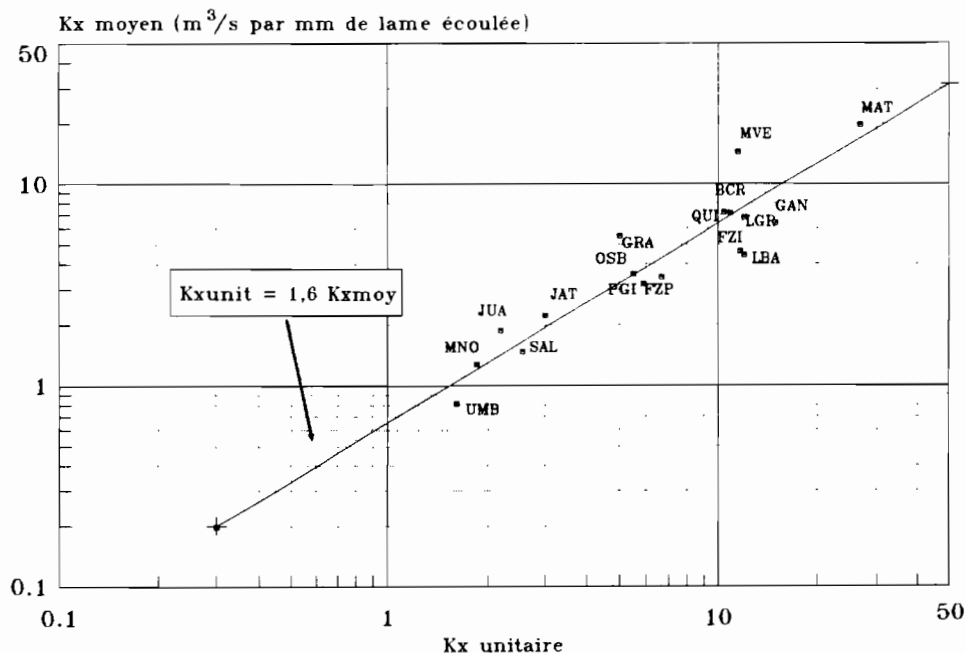


Figure 5.6 Kx moyen en fonction de Kx unitaire. Toutes zones

5.5 DISCUSSION : LES FACTEURS CORRECTIFS DES CRUES.

Nous avons établi les formules de calcul de la crue de projet en nous basant sur la moyenne des bassins situés sur le socle cristallin les plus dangereux.

5.5.1 Correction à apporter quand le bassin est sédimentaire.

La relation entre Kx et la surface S de la figure 5.7 est moins cohérente pour les bassins sédimentaires, d'abord parce que l'échantillon de bassins est très hétérogène et aussi parce qu'une partie des coefficients ont été établis en 1964, en utilisant des techniques et des normes de calcul sensiblement différentes de ce que nous utilisons actuellement, en particulier en ce qui concerne la séparation des écoulements ou l'évaluation des temps de base. Par ailleurs les données originales ont disparu, ce qui nous interdit tout nouveau calcul. Nous constatons sur le graphique 5.4.2 que le Kx "sédimentaire" paraît être supérieur de 40 % à 60 % au Kx "cristallin". Cependant, ceci est largement compensé par le fait que les lames écoulées des crues de ces mêmes bassins sédimentaires sont 3 ou 4 fois plus faibles⁶.

En fin de compte le bilan final de ces deux corrections contradictoires entraînera une diminution d'environ 50 % du débit de pointe.

⁶RODIER (1989) arrive à des conclusions semblables dans sa récente étude sur les bassins perméables. Il émet l'hypothèse que, dans ce type de bassin, seule une partie du bassin contribue effectivement aux crues, ce qui provoque une diminution des lames et des temps d'écoulement.

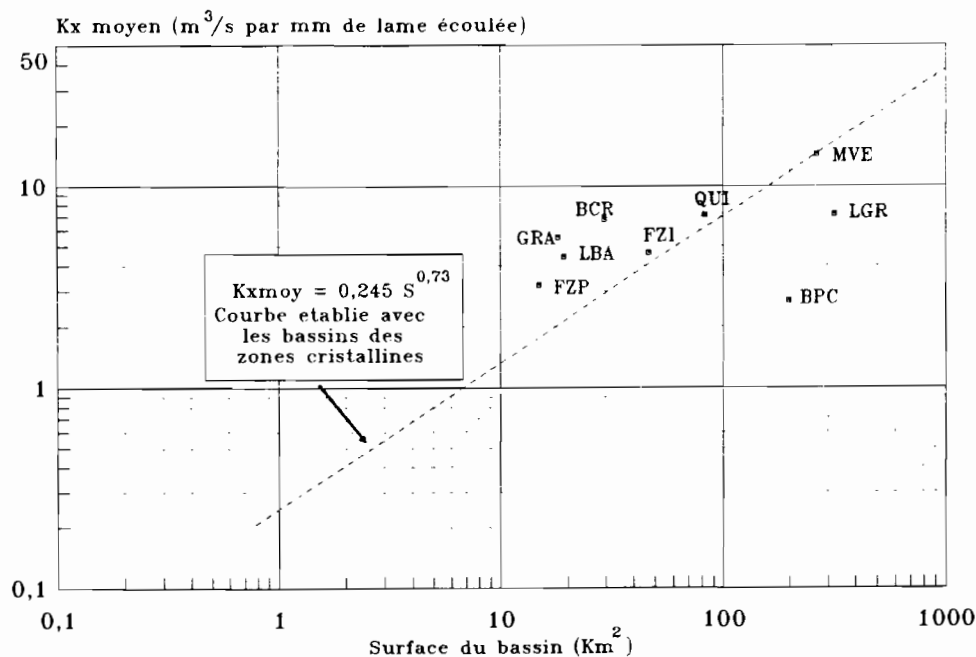


Figure 5.7 Kx moyen en fonction de la surface. Bassins des zones sédimentaires

En considérant la dispersion et la faible taille de l'échantillon de bassins sédimentaires et par mesure de prudence, nous ne proposerons qu'une diminution de 33 % du débit de pointe de la crue de projet. Compte tenu de l'exposant de la formule utilisée, cette diminution de 33 % du débit revient à appliquer la formule établie pour le cristallin, en ne considérant que la moitié de la surface du bassin :

$$Q = 25.Sc^{0,58} \text{ avec } Sc = S/2$$

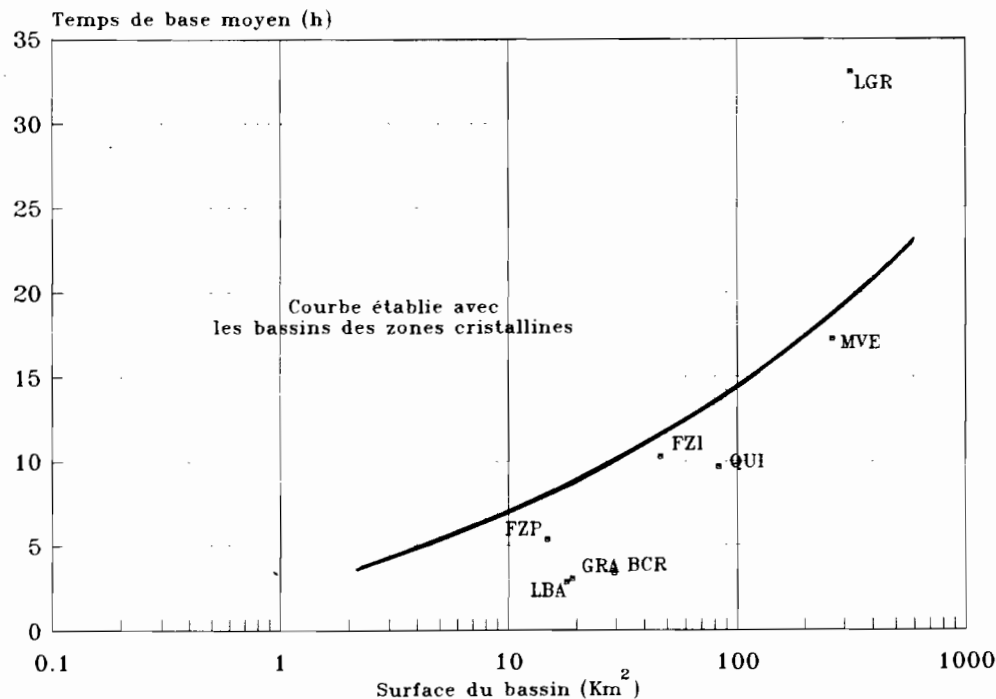


Figure 5.8 Temps de base moyen, en fonction de la surface. Bassins des zones sédimentaires

5.5.2 Les autres facteurs correctifs.

Le bon sens conduit, comme l'ont fait certains auteurs, à rechercher l'influence sur les débits de crue de facteurs tels que la forme ou le relief du bassin, la présence de zones particulièrement imperméables ou, au contraire, susceptibles de retenir l'eau ou, enfin, l'existence de conditions climatiques locales exceptionnelles.

A notre grand regret, la petite taille et la grande dispersion de l'échantillon de bassins dont nous disposons nous ôte tout espoir d'effectuer une étude directe et spécifique au Nordeste de l'influence de ces facteurs. Nous nous reporterons donc aux travaux d'autres auteurs et essaierons d'adapter les solutions proposées dans des conditions comparables.

Nous nous sommes inspirés principalement des auteurs suivants :

- F.G. de AGUIAR, auteur très connu dans le Nordeste, où sa méthode y est très souvent utilisée.
- Des travaux et synthèses réalisés en Afrique, dans des conditions climatiques similaires, par les organismes et auteurs suivants : ORSTOM, CIEH, GRET, J. RODIER, P. RIBSTEIN, C. PUECH, P. DUBREUIL et G. GIRARD.
- Des travaux et synthèses réalisés par la SUDENE et l'ORSTOM à l'occasion de l'élaboration de la Monographie hydrologique du Val du Jaguaribe (GVJ).
- Des travaux et formules utilisés par le Bureau of reclamation (BUREC) et le Soil and Conervation Service, des USA.
- Des travaux du programme de Bassins Versants Représentatifs et expérimentaux de la SUDENE.

■ Détermination du coefficient de correction de forme du bassin (C_{form}).

Il est évident que la forme du bassin influera sur le temps de base des crues. Pour la représenter, nous avons choisi L , la longueur du cours d'eau le plus long, qui est déterminée traditionnellement par les hydrologues du Nordeste, puisqu'elle intervient dans la formule d'AGUIAR.

En simplifiant beaucoup la réalité et en considérant la théorie des lignes isochrones, la surface de la bande élémentaire qui produit la pointe de crue est proportionnelle à la "largeur" maximum l_{max} du bassin. Cette largeur est grossièrement proportionnelle à S/L^2 .

Valeurs du facteur C_{form}

L^2/S	1	2	3	4	5	6	7
Coefficient de Gravelius	1,12	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
C_{form}	1	1	0,85	0,75	0,70	0,65	,63

Les chiffres du tableau de correction proposé ont été obtenus à partir des éléments suivants :

a) **La formule d'AGUIAR.** Pour cette formule, lorsque la compacité du bassin varie entre deux valeurs extrêmes : compacte ($L^2/S = 2$) et très allongée ($L^2/S = 8$), les débits de pointe de crue diminuent de 30 à 50 %, suivant la taille du bassin.

b) **Les solutions proposées par RIBSTEIN dans la maîtrise des crues dans les bas fonds.** Il recommande lui aussi, pour des bassins de surface inférieure à 10 km^2 , une diminution du Q_{max} lorsque les valeurs du coefficient de Gravelius C sont supérieures à 1,30. Les valeurs proposées par RIBSTEIN reviennent à une correction C_{form} de 0,70 quand le coefficient de Gravelius C est de $C = 1,42$. Pour $C = 1,54$ C_{form} s'abaisse à 0,64. On calcule le coefficient C de Gravelius par la formule :

$$C = \frac{L + l}{(3,14 \times L)^{0,5} \times l}$$

L et l étant respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent du bassin.

■ Détermination du coefficient de correction de forme du réseau hydrographique de drainage C_{dren}

Les chiffres du tableau de correction suivant ont été obtenus en nous basant sur ce que propose RIBSTEIN dans le même ouvrage. Ce dernier recommande une majoration (ou minoration) maximale de 30 % pour les débits de pointe, en fonction des anomalies de forme du réseau de drainage. Nous avons adopté des coefficients de correction légèrement inférieurs à ceux proposés par RIBSTEIN.

Attention, il faut avoir présent à l'esprit que les corrections C_{form} et C_{dren} présentent une certaine redondance et que l'on risque, pour certains bassins, de corriger deux fois la même chose. Ce peut être le cas, par exemple, d'un bassin qui serait à la fois très allongé et dont le réseau hydrographique serait aussi en arête de poisson.

Valeurs du facteur C_{dren}

Aspects du Réseau de drainage	Valeurs du coefficient C_{dren}
Normal	1
Arête de poisson	0,75 à 1
Radial	1 à 1,20

■ Détermination du coefficient de correction par le relief C_{rel} .

Les chiffres du tableau de correction proposé ont été obtenus à partir des éléments suivants :

a) AGUIAR propose une classification des bassins en 8 types, classification qui fait intervenir le relief, la présence éventuelle de dépressions et la nature du sol. Nous avons résumé les critères de classification proposés par AGUIAR au paragraphe 5.4.3. En appliquant sa formule pour $S = 500 \text{ km}^2$, les débits de pointe des deux types de relief extrêmes varient dans un rapport de 3.

b) Les Bassins Versants Représentatifs (BVR) exploités par la SUDENE, avec lesquels nous avons déterminé les équations qui permettent le calcul du débit de pointe, peuvent être classés dans les types 2 ou 3 définis par AGUIAR (bassin bien accidenté sans dépression évaporatoire ou bassin moyen). Le débit de pointe de ce type de bassin, toujours selon AGUIAR, sera inférieur de 10 à 15 % au débit des bassins les plus dangereux qui sont les bassins du type 1.

Valeurs du facteur C_{rel}

RELIEF	Montagneux et Escarpé	Fort à Ondulé	Ondulé	Faible à Ondulé	Plan
PENTES	> 25%	15 à 25%	15 - 8%	3 - 8%	0 - 3%
C_{rel}	1,1 à 1,2	1	1	0,8	0,6

■ Détermination des coefficients de correction de dégradation quand la surface du sol est compactée ou les horizons supérieurs sont tronqués C_{degr} et F_{acr}

Nous ne disposons que de trois bassins représentatifs dont les sols soient compactés ou tronqués. On observe, sur ces bassins, une dégradation de la superficie du sol (compactage et colmatage des orifices) ou "effet de surface" : les micro-bassins 3 et 4 de Sumé et celui de l'açude Luzimar. Sur ces petits bassins, nous avons constaté un accroissement de l'écoulement annuel de l'ordre de 200 à 300 %, par rapport à un bassin analogue, sans végétation, mais avant l'apparition de "l'effet de surface". L'accroissement de la lame de crue décennale est, lui, plus faible de l'ordre de 30 à 40 %. Il est donc évident que les valeurs des lames décennales de 40 et 20 mm sont sous-estimées pour ce type de bassin.

Nous proposons de multiplier le débit de pointe par $(1 + F_{acr} \times S_{degr})$.

* S_{degr} est la proportion du bassin effectivement dégradée.

* Le coefficient F_{acr} vaut 0,5 ou 1,0 :

- La valeur de 0,50 que nous proposons pour les sols dont le L_{600} est supérieur à 30 mm a été déterminée en nous basant sur l'augmentation des écoulements sur les trois bassins cités.

- Pour les sols dont le L_{600} est inférieur à 30 mm, nous pouvons craindre un aggrèvement relatif plus rapide du risque et suggérons un facteur de F_{acr} de 100 %, puisque le contraste entre les zones dégradées et les zones intactes peut augmenter beaucoup, surtout si l'on est en présence d'effets dits de "surface".

Les valeurs de F_{acr} proposées dans le tableau de correction suivant sont très grossières et indiquent seulement l'ordre de grandeur d'un phénomène très complexe qu'il serait illusoire de vouloir approfondir ici.

Valeurs du facteur F_{acr}

Valeur de L_{600}	Valeur de F_{acr}
Inférieur à 30mm	1,0
Supérieur à 30mm	0,5

■ Détermination du coefficient de correction climatique C_{clim}

Le tableau 4.5.4 indique une diminution de 45 % de la lame de la crue décennale dans la zone de transition, pour une pluviométrie annuelle de 600 mm. Cette diminution n'est plus que de 30 % pour une pluviométrie annuelle de 800 mm.

L'étude de la distribution statistique des totaux en 24h et des intensités des pluies de ces zones montre également une diminution de l'ordre de 20 % des valeurs décennales. Nous proposons, pour cette zone une diminution de 25 % des débits de la crue de projet qui correspond à un coefficient C_{clim} de 0,75. Il faudra, bien évidemment, confirmer cette valeur par des études spécifiques ultérieures.

■ Limitation imposée à la correction globale.

Les facteurs correctifs que nous proposons ne doivent être utilisés que lorsque le bassin présente des caractéristiques très différentes de la moyenne. Le facteur de correction global est obtenu par la formule

$$F_c = C_{form} \times C_{dren} \times C_{rel} \times C_{degr} \times C_{clim}$$

La multiplication en série de tous ces facteurs n'a de sens que si la correction finale reste proche de l'unité. Nous avons donc limité, arbitrairement, les variations du facteur global entre $0,5 C_{clim}$ et $1,2 C_{clim}$. Ce procédé est, certes, un peu brutal, mais il évitera une utilisation de la méthode proposée hors de son domaine de validité et bornera les erreurs involontaires d'utilisateurs trop zélés qui ne manqueront pas d'effectuer des corrections intempestives.

5.5.3 Validation.

L'avant dernière colonne du tableau 5.1 indique la valeur Q_{10} du débit de pointe de la crue décennale, valeur qui a été estimée directement à l'aide de méthodes hydrologiques classiques, lors de l'élaboration du rapport final de chaque bassin. La dernière colonne du même tableau indique le rapport :

$$Q_{\text{projet}} / 2 * Q_{10}$$

Ce rapport doit être toujours supérieur à l'unité. Si ce n'était pas le cas, cela prouverait une sous-estimation de la crue décennale calculée par la formule de transposition que nous proposons. Ceci représenterait évidemment un risque inacceptable pour la sécurité des ouvrages et impliquerait la reprise de toutes nos estimations.

Pour 5 bassins sur 17 ce rapport diffère de moins 20 % de l'unité. Ceci signifie que la formule que nous proposons fournit une estimation correcte du débit de la crue de projet pour ces 5 bassins dont les crues sont les plus dangereuses.

Tableau 5.4 Validation du débit de la crue de projet des cinq bassins les plus dangereux

Bassin	$\frac{Q_{\text{proj}}}{2 * Q_{10}}$	Observations
Faz.Passagem	0,80	Bassin sur sédimentaire présentant des coefficients de ruissellement très élevés pour sa catégorie
Caldeirão	0,93	Bassin de faible surface dont la crue de projet est inférieure à $2 * Q_{10}$ (voir explications à la fin du paragraphe 5.4.2)
Mundo novo	0,97	Bassin présentant une partie importante de solonetz qui peuvent être considérés comme des sols dégradés
Quixabinha	1,03	Fort relief
Juatama	1,05	Fort relief

Pour tous les autres bassins, ce rapport est beaucoup plus grand que 1, ce qui prouve que le débit de la crue de projet de ces autres bassins est surestimé. Ceci joue dans le sens de la sécurité. Coloroirement, aucun des bassins n'a vu ses débits de crue gravement sous-estimés par la formule que nous proposons.

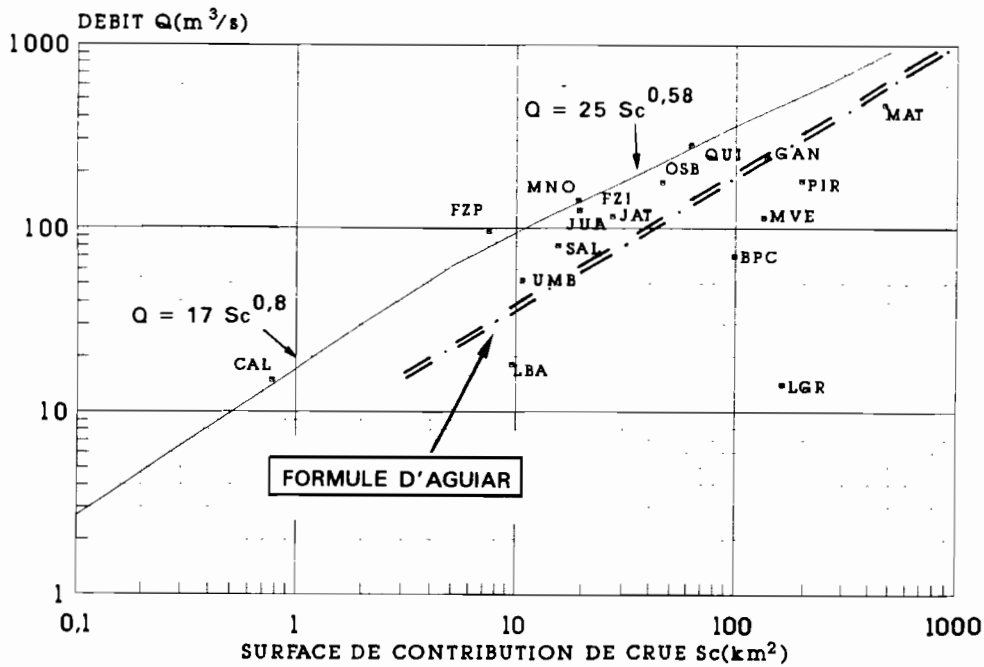


Figure 5.9 Comparaison du double de la crue décennale estimée à la crue de projet calculée par la formule proposée

Comparaison des formules de la SUDENE et d'AGUIAR

Comparons la formule que nous venons d'établir à celle proposée par F. AGUIAR (1940) qui est, nous l'avons vu, la formule la plus couramment utilisée dans le Nordeste. Cette formule a déjà été reproduite au paragraphe 5.4.3.

En faisant varier la surface du bassin entre 10 et 5000 km², nous avons calculé les débits de pointe avec la formule d'AGUIAR pour 3 types de bassins :

- K = 0,1 - le plus dangereux : "Petit, escarpé et rocheux"
- K = 0,35 - intermédiaire
- K = 2,5 - le moins dangereux : "Quasi-horizontale, terrain sableux"

et pour deux compacités :

- Compact : $L = 1,4 (S)^{0,5}$
- Allongé : $L = 2,8 (S)^{0,5}$

Les mêmes calculs ont été effectués en utilisant la formule que nous proposons et que nous avons baptisée "Formule SUDENE-ORSTOM" : $Q_x = 25 * (Sc)^{0,58} * F_c$, pour trois valeurs de F_c :

- $F_c = 1,2$ (Les plus dangereux)
- $F_c = 1$ (Bassin normal, sans correction)
- $F_c = 0,5$ (Bassin moins dangereux)

Tableau 5.5 Comparaison des débits de crues calculés avec les formules d'AGUIAR et SUDENE/ORSTOM

FORMULE	FORME	SURFACE	5000km ²	1000	500	100	10
A G U	Compact	K = 0,1	4853m ³ /s	1506	904	274	49
		K = 0,35	3459	1195	738	232	43
		K = 2,5	874	455	327	137	31
I A R	Allongé	K = 0,1	3219	1033	626	191	35
		K = 0,35	1968	750	478	158	30
		K = 2,5	349	201	153	73	20
S U D E N E	CORRECTION						
		1,2	1103	434	114	4193	1650
		1	919	361	95	3495	1373
		0,5	460	181	48	1747	687

La comparaison des deux formules montre que :

- a) Pour les surfaces inférieures à 100 et surtout à 10 km², les valeurs calculés par AGUIAR sont bien inférieures à celles proposées par la SUDENE/ORSTOM. Pour ces petits bassins on doit absolument utiliser la formule SUDENE/ORSTOM. Cette sous-estimation des débits de crue des petits bassins par la formule d'AGUIAR (qui n'avait, d'ailleurs, pas été conçue pour cela) est grave. Elle peut expliquer une partie des trop nombreuses ruptures de petits barrages constatées ces dernières années.
- b) Pour 500 ou 1000 km², les deux formules fournissent des résultats équivalents.
- c) Notons que, les plus faibles valeurs de la formule de la SUDENE/ORSTOM sont bien supérieures aux plus faibles valeurs d'AGUIAR. Ceci est normal, car la surface Sc considérée dans la formule de la SUDENE peut être inférieure à la surface réelle du bassin. C'est le cas, par exemple d'un bassin sédimentaire ou de bassins sableux, qui correspondent à K = 2,5 dans la formule d'AGUIAR.

En conclusion :

En dessous de 500 km² - utiliser pour les crues la formule SUDENE/ORSTOM, $Q_x = 25 * (Sc)^{0,58} * F_c$ ou $17.Sc^{0,8}$.

Au dessus de 1000 km² - utiliser la formule d'AGUIAR

Les deux formules sont utilisables entre 500 et 1000 km².

SIXIEME PARTIE

6. CONCLUSION GENERALE

Nous avons cherché à condenser, réunir et effectuer la synthèse des connaissances actuelles sur les régimes hydrologiques des petits bassins d'une région tropicale semi-aride du Brésil couvrant environ 800.000 km². Cette synthèse doit aussi déboucher sur une méthode simple d'évaluation des ressources en eau et des débits des crues. Vaste programme et objectifs ambitieux, s'il en est ! Nous les avons atteints très imparfaitement. A chaque pas, nous avons rencontré des interrogations, des hypothèses, des données ou des calculs à vérifier. Nous avons dû trancher en nous appuyant sur nombre d'hypothèses dictées par le bon sens, l'intuition, l'expérience et/ou le raisonnement. Certaines d'entre elles n'ont été émises et utilisées que pour pouvoir sortir d'une impasse et franchir une étape supplémentaire vers les objectifs qui ont sous-tendu notre travail. Elles ont souvent été justifiées (ou n'ont pas été infirmées) bien longtemps après, par la cohérence des résultats finaux.

Ce travail est tout d'abord une oeuvre collective. Il représente le résultat de quinze ans d'efforts d'une équipe franco-brésilienne. Il n'aurait pas vu le jour sans les fructueux échanges entre hydrologues et pédologues. Les premiers apportant les valeurs numériques des pluies, des écoulements, de leur répartition dans l'espace et dans le temps ainsi que les techniques d'optimisation et de modélisation. Les seconds apportant leur connaissance des comportements hydrodynamiques des sols, des interactions entre les différents sols coexistants le long des versants. Les pédologues ont eu, enfin, un rôle décisif dans les regroupements de sols qui ont permis la détermination des coefficients L600.

6.1 NOS CHOIX, NOS PRIORITES ET NOTRE ACTION

■ **Priorité à la valorisation des données existantes**

Nous nous sommes efforcés d'utiliser et de valoriser la considérable (mais mal exploitée) masse de données recueillies au cours des dernières décennies : 4.000 stations-années de mesures, tous-appareils-confondus, sur le réseau de bassins représentatifs de la SUDENE ; 72 parcelles d'érosion gérées par les instituts de recherche agronomique ; les données du réseau général, etc.

Nous n'avons pu concevoir et organiser qu'une petite partie des mesures qui auraient été nécessaires pour conforter, valider ou compléter cette synthèse. Tel bassin aurait mérité, par exemple, des mesures de terrain complémentaires, par parcelles ou simulateur de pluie, tel autre aurait eu besoin d'une évaluation plus précise de ses limites, de l'état de sa couverture végétale ou du décompte de ses açudes ; il aurait été bien sûr souhaitable d'utiliser les ressources offertes par la télédétection ou la couverture cartographique élaborée par radar. Cela n'a pas pu être réalisé, faute de moyens et de détermination de la part des

organismes brésiliens concernés. Que peut faire un chercheur face à 800.000 km² ? On ne peut pas improviser un OURSI ou un HYPERBAV¹.

Notre rôle s'est limité, plus modestement, à essayer de réaliser les actions complémentaires jugées à la fois prioritaires et à notre portée.

■ Etudes de terrain : lignes directrices

* *Etude des sols et du couvert végétal*

Tout d'abord, grâce à la collaboration de pédologues (LEPRUN *et al.*, 1983 ; ASSUNÇÃO *et al.*, 1984), qui assurèrent en fait l'essentiel de ce travail, une cartographie pédologique de tous les bassins représentatifs a pu être dressée. Cette cartographie, orientée vers la compréhension des mécanismes hydriques, a été accompagnée de mesures d'infiltration par la méthode de MUNTZ réalisées sur 52 unités de sol jugées stratégiques. Ce travail a été un préalable indispensable vers l'appréhension du rôle des sols, vers la typologie et les regroupements de bassins que nous avons pu en déduire et, finalement, vers la proposition des valeurs de L₆₀₀ des différents types de sols.

* *Etude de bassins plus petits et plus homogènes*

Les difficultés rencontrées lors de l'élaboration du premier rapport de synthèse final d'un bassin versant, celui du RIACHO DO NAVIO, nous ont convaincu de la nécessité d'étudier des bassins plus petits et plus homogènes. Ceci est une condition nécessaire pour démêler une partie de l'écheveau des facteurs conditionnels des régimes. Nous pourrions énoncer ce principe de la façon suivante : "Si l'on veut mettre en évidence et quantifier l'influence d'un facteur, il faut impérativement étudier deux ou plusieurs bassins les plus semblables possibles, mis à part les variations du facteur étudié". Ceci peut s'exprimer plus prosaïquement par : "*on ne peut étudier correctement qu'une chose à la fois*".

Les études implantées après 1980 ont été conçues en fonction de ce principe :

- Etude de bassins plus petits ; multiplication du nombre de petits bassins. Pour pouvoir le faire à un coût raisonnable, nous avons organisé la mesure systématique des volumes d'eau captés par tous les petits açudes pour lesquels c'était possible.
- Suivi de parcelles de 100 m² et de micro-bassins de 1 ha sur les bassins expérimentaux de SUME et de TAUA, pour mettre en évidence l'influence des variations de la végétation ou du sol à cette échelle.

¹OURSI et HYPERBAV sont des exemples de grands programmes multidisciplinaires réalisés sous le leadership de l'ORSTOM en Afrique tropicale. Les chercheurs ont eu une grande latitude pour définir les lieux, objets et techniques d'étude en fonction des objectifs recherchés. L'utilisation et la mise au point de techniques nouvelles comme la télédétection ou la simulation de pluie, ont entraîné une progression significative des connaissances hydrologiques actuelles.

6.2 FONCTIONNEMENT DES BASSINS REPRESENTATIFS

■ Apport des différents bassins

Chaque bassin représentatif contribue, à sa manière, à l'accroissement des connaissances actuelles en hydrologie dans le Nordeste

* TAUA est le bassin qui apporte le plus grand nombre d'informations inédites :

- Le grand nombre de petits bassins étudiés permet d'ébaucher une **typologie régionale** de bassins en fonction des sols et de la végétation.
- Une série de **bassins emboîtés**, dont la surface varie entre l'hectare et 5.000 km², nous montre qu'il n'y a pas, apparemment, de diminution des lames écoulées annuelles avec la surface du bassin dans cette région, tant que ce dernier ne contient pas, soit un bas-fond alluvial, soit un **açude important**. C'est généralement le cas pour les bassins de surface inférieure à 10 km². Ce résultat qui touche à l'un des points polémiques de la recherche actuelle, "*l'effet d'échelle*", n'était pas évident, a priori. C'est une recherche qu'il faudra poursuivre.
- On a pu fournir une estimation grossière et indirecte de la **diminution d'écoulement induite par des açudes**.
- Les observations réalisées sur un tout petit bassin, recouvert entièrement de **vertisols**, ont permis de proposer une valeur pour les écoulements de type de sol, ce qui représente une information inédite.

* SUME apporte des informations fondamentales sur l'influence des variations de la **couverture végétale et de l'état de surface du sol** de tout petits bassins situés sur des sols bruns non calciques vertiques.

L'écoulement est multiplié par **un facteur de 20** entre les deux situations extrêmes. L'augmentation de cet écoulement provient surtout de l'accroissement du ruissellement des petites et des moyennes pluies, provoqué par la suppression de la végétation et la dégradation de la surface du sol.

Les études menées dans le cadre de l'ATP PIREN ORSTOM-CNRS-INRA ont montré toute la complexité des phénomènes de circulation hydrique, à l'échelle du profil et du versant.

- * L'information hydrologique apportée par le bassin du **RIACHO DO NAVIO** est moins riche, car le nombre des bassins est trop petit et leur taille (et donc leur complexité) est trop grande. La faiblesse relative de ses écoulements est à rapprocher de l'importance de la surface occupée par des régosols. Ce bassin a fait l'objet, en 1979, du premier des rapports de synthèse finaux. Ce rapport contient quelques analyses et études originales qui n'ont pas été répétées dans les rapports suivants. Il s'agit de l'étude de l'intensité et des coefficients d'abattement des pluies, d'une tentative de calage d'un modèle hydrologique mensuel, d'une étude du bilan hydrique d'un açude et d'une estimation de l'évaporation de la retenue.
- * **JUATAMA** apporte des informations sur le comportement de **régions rocheuses** dont le potentiel hydrique est élevé. Malheureusement, ces régions sont hétérogènes et la confiance statistique que l'on peut apporter à **un seul bassin** est évidemment faible.
- * **IBIPEBA** et les autres bassins "non cristallins" du **Val du Jaguaribe** fournissent une information sur les **zones sédimentaires** où l'on constate des écoulements plus faibles que dans les régions sur socle cristallin². Les grands et les petits bassins de ces zones, dont l'hydrologie est complexe, sont mal connus ; les données fournies par ces bassins représentatifs pourront être le point de départ d'une étude hydrologique de base. Cette étude devra impérativement être complétée par une étude hydrogéologique

Et si c'était à refaire ? Que recommanderions-nous ?

*** Utilisation des données du réseau général**

Nous constatons, tout d'abord, que l'information apportée par les **stations du réseau général** et les **grands açudes de la région** a été très peu utilisée. Or les grands bassins intègrent les écoulements des petits bassins. Il est donc utile de connaître l'hydraulicité de ces grands bassins pendant la période d'observation des bassins représentatifs. Ils permettent une vérification globale de la cohérence des données, la détection d'erreurs et facilitent l'estimation régionale des paramètres hydrologiques. A TAUA, les données du grand açude appelé Várzea do Boi et à SUME celui de l'açude SUME auraient dû remplir ce rôle de stations de référence.

*** Une étude de bassin versant doit évoluer en fonction des résultats obtenus.**

Une étude de petits bassins doit être un processus qui évolue en fonction des résultats. Cela implique un traitement et une interprétation rapide des données. Nous avons accès, maintenant, aux facilités apportées par les nouvelles techniques de traitement automatique et de capteurs digitaux. Ceci permet de définir et d'organiser, au cours de l'étude, des mesures complémentaires pour valider telle hypothèse ou préciser la valeur numérique de tel paramètre.

Les deux exemples montrent bien que, malgré la qualité et la durée de leurs données, malgré notre connaissance du terrain et des sols, nous sommes encore loin de disposer de tous les éléments nécessaires pour expliquer correctement les variations que nous constatons.

²La dégradation hydrographique observée sur le bassin d'IBIPEBA est très importante. Mais comment la transposer?

* Prenons le cas de SUME : les écoulements sont multipliés par 6, puis de nouveau par 3, suite à la suppression de la végétation. Quelle est la part de cette augmentation que l'on peut attribuer à la disparition de l'écran de la végétation et des feuilles mortes ou au fait que le sol, non perturbé par les racines et animaux, est plus compact et moins perméable, où encore à des effets de dégradation de sa surface ? Dans quelle mesure peut-on utiliser ces résultats pour un autre type de sol ? etc.

* Dans le cas du bassin de JUATAMA, où nous avons identifié deux zones productrices d'écoulement. Quelle est la part des écoulements qui provient des affleurements de roche ? des Solonetz ? Comment extrapoler les résultats vers d'autres bassins ?

6.3 ESTIMATION DES ECOULEMENTS ANNUELS

Pour permettre une utilisation des résultats obtenus sur ces bassins, il a fallu, tout d'abord, mettre au point une méthode de transposition des écoulements annuels.

Chacune des étapes de ce parcours s'est révélée riche en embûches, mais aussi en découvertes.

■ Zones climatiques

Comment aurait-on pu prévoir la grande homogénéité des régimes à l'intérieur des zones que nous avons appelées "**grandes zones climatiques**", entre l'extrême Nord et le Sud du Sertão, alors que les perturbations qui engendrent les précipitations sont d'origine différente : front intertropical dans le Nord ; incursions du front polaire dans le Sud, alors que les dates et même le nombre des périodes pluvieuses sont différentes ? Qui aurait pu prédire l'ampleur des différences constatées entre les zones Sertão et de Transition ? A pluviométrie annuelle égale et pour un même type de bassin, les modèles utilisés indiquent un écoulement deux fois plus fort dans le Sertão ! Il faut organiser d'urgence la vérification sur le terrain de ces variations. Il est intéressant de noter que le régime de la zone de l'Afrique tropicale comprise entre l'isohyète 400 et 800 mm est très proche, selon nos critères climatiques, de celui de la grande zone climatique "Sertão". Que de questions à poser aux climatologues !

■ Modèles et typologie des bassins

L'ajustement systématique de modèles de simulation aux chroniques de pluie et de débit de tous les bassins et la mise en oeuvre de ces modèles en utilisant comme entrée tous les pluviomètres de qualité acceptable ont permis de s'affranchir des anomalies climatiques de la période d'observation propre à chaque bassin. Nous avons aussi mis en évidence une relation de forme exponentielle entre les moyennes annuelles des lames calculées par simulation (L) et des pluviométries (P) : $L(P) = L_{600} e^{A(P-600)}$.

Cette relation est valable pour des valeurs de P comprises entre 400 et 1000 mm, ce qui correspond à toute la zone semi-aride.

L_{600} et A sont deux paramètres qui caractérisent globalement l'écoulement calculé par le modèle et donc, le bassin. Ces paramètres seront la base de notre typologie.

Les regroupements de bassins selon L_{600} et A s'effectuent de manière logique par rapport aux sols et à la végétation de ces bassins : des sols peu épais et une végétation dégradée caractérisent l'un des pôles du regroupement ; une forte protection du couvert végétal et/ou une capacité de stockage élevée caractérise les bassins de type opposé. Le groupe de bassins sur sous-sol sédimentaire se détache nettement. Une typologie des bassins a pu ainsi être dressée. L'évolution des micro-bassins de SUME entre les différents groupes, au fur et à mesure de leur dégradation et du décapage de leurs sols, est très significative.

■ Méthode de transposition

Cette typologie, malgré sa cohérence, ne permet pas une quantification directe des ressources en eau. Nous avons eu recours, pour cela, à l'information acquise sur le réseau général de mesure hydrométrique du Nordeste, qui, alliée à l'utilisation des cartes de sol de l'EMBRAPA, nous a permis de proposer une méthode d'évaluation des ressources en eau relativement simple à mettre en oeuvre.

La méthode de transposition que nous proposons repose sur plusieurs postulats :

a) Validité et limites de la modélisation et de la typologie des bassins :

On suppose que les réactions des modèles représentent fidèlement les comportements réels des bassins. Et que les grandes variations d'écoulement calculées pour les différentes zones climatiques reflètent la réalité.

b) Echelle des cartes pédologiques de l'EMBRAPA et des cartes détaillées des BVR.

On suppose que la typologie des sols établie sur les petits bassins, pour lesquels une cartographie pédologique détaillée et spécifique a été dressée dans une optique hydrologique, peut s'appliquer à la légende de cartes de reconnaissance dressées à une autre échelle et dans une autre optique.

c) La dégradation hydrographique.

On suppose, que la méthode de classification des sols proposés intègre la dégradation hydrographique que l'on constate parfois quand la taille du bassin s'accroît. Ceci pour deux raisons :

- Le Nordeste du Brésil a une orogénèse active. Il n'existe pas, dans les petits et moyens bassins, de grandes zones endoréiques.
- Plus les bassins sont grands, plus les bas-fonds perméables et de faible relief sont importants³ ; ceci explique une diminution des lames écoulées avec la surface. De part sa conception, le système de classification proposé calculera automatiquement une baisse de l'écoulement. Mais n'y a-t-il pas d'autres facteurs ?

Cette méthode fait maintenant partie d'un manuel pratique, destiné aux programmes d'extension rurale. Son emploi requiert les valeurs de la surface du bassin versant, du total annuel des précipitations, de la classification des sols du bassin, d'une appréciation de l'état de la couverture végétale, de l'importance des açudes présents dans le bassin et de l'existence de zones de rétention d'eau. Pour des bassins versants de surface supérieure à 50 km², les cartes de sols de l'EMBRAPA peuvent être utilisées pour classer les sols du bassin. En dessous de cette surface il faut effectuer une vérification ou une cartographie pédologique sommaire.

6.4 ESTIMATION DES CRUES

Les formules que nous proposons pour le calcul des débits de pointe des *crues* sont de forme très simple. Elles ne sont fonction que de la surface du bassin et d'un facteur de correction.

Ces formules correspondent en fait à "*l'enveloppe supérieure*" des débits que l'on pourrait craindre. Sa simplicité s'explique de la façon suivante :

- Faible variation dans l'espace des valeurs des pluies de faibles fréquences ou de la "*pluie de projet*" ;
- l'échantillon de bassins dont nous disposons est de taille et de variabilité insuffisantes pour que l'on puisse espérer estimer directement une valeur quantitative de l'influence des facteurs conditionnels classiques des crues (relief, forme, réseau de drainage, etc.). Compte tenu de l'absence de données consistantes, nous avons préféré inclure l'influence de ces facteurs dans un coefficient correctif global appelé F_c , d'utilisation plus simple.

Une amélioration de ces formules passe par une étude du rôle des facteurs qui conditionnent la forme, le volume et le débit des crues, rôle qui est encore très mal connu dans le Nordeste.

³En règle générale les vallées du Nordeste du Brésil ont des formes moins ouvertes et les zones de bas-fond sont moins importantes que dans le Sahel africain.

6.5 PERSPECTIVES ET PRIORITES POUR LA RECHERCHE HYDROLOGIQUE

Nous avons identifié plusieurs thèmes de recherche qui pourront combler des lacunes dans les connaissances fondamentales et/ou répondre aux questions des développeurs.

■ Comment organiser les mesures ?

Il faudra, dans tous les cas, rechercher si des données qui permettent de répondre à la question n'existent pas déjà. Le protocole et la durée des études dépendront ensuite de l'objectif recherché. On pourra par exemple :

- Effectuer des campagnes de mesures intensives, mais de courte durée, sur des points stratégiquement choisis le long du parcours de l'eau sur le versant. On aura tout intérêt à se situer dans un environnement dont on connaît déjà le mode de fonctionnement, un des anciens BVR, par exemple.
- Organiser le suivi hydrologique d'un nombre important d'açudes, choisis pour mettre en évidence des différences de comportement.
- Organiser une étude *classique* de Bassin Versant.
- Utiliser l'information fournie par les stations du réseau général, ou les grands açudes dont les bassins intègrent les écoulements de toute une région.

■ Comment améliorer l'estimation des écoulements annuels ?

Nous avons montré que cinq facteurs principaux influent sur l'écoulement annuel d'un petit bassin :

- . Les sols : l'état de leur surface et leur nature en profondeur.
- . L'état de la végétation.
- . Le gradient de perméabilité de l'amont vers l'aval; les zones de rétention d'eau.
- . Le nombre et la taille des açudes.
- . La pluviométrie annuelle et la zone climatique.

Les recherches destinées à améliorer l'estimation des écoulements annuels devront, naturellement, être conçues pour mieux connaître le rôle de ces facteurs. Donnons quelques exemples :

■ L'étude des facteurs sol et végétation :

Pour mieux connaître les trois premiers facteurs, il faut tout d'abord définir clairement l'objectif de la recherche.

- * On peut vouloir mieux connaître, par exemple, le comportement d'un type de sol et de ses variantes. Prenons le cas des **planosols** ; ils couvrent 8 % du Nordeste. Ont-ils tous un L_{600} proche de la valeur de 70 mm indiquée dans la méthode ? Si ce n'est pas le cas, quels sont les critères de discrimination ? Peut-on reconnaître leur signature sur des images satellite ? Quelles sont les valeurs de L_{600} que l'on peut attendre des différentes variantes ? Les planosols de l'Etat de la Bahia sont-ils semblables à ceux du Ceará, cartographiés à une autre époque, avec des techniques différentes ?
- * On peut chercher à répondre à des questions analogues pour les sols **bruns non calciques** ou les **lithosoliques**, qui représentent une grande part des sols des régions où l'on construit des açudes. Il est urgent de mieux connaître les sols avec **affleurements** ou des sols **podzoliques** dont l'écoulement varie beaucoup selon les autres caractéristiques de ces sols.
- * Il est important de mieux comprendre les mécanismes de rétention d'eau le long des versants, d'identifier des situations typiques et d'étudier les conditions d'extrapolation.
- * L'influence de la **végétation** doit être considérée sous plusieurs angles :
 - Que se passe-t-il quand on la supprime, juste après le défrichement et quand une végétation pionnière repousse ?
 - Quels sont les effets des divers types de culture et pratiques conservacionnistes ?

■ Les zones climatiques.

Il faut organiser, de manière urgente, des mesures pour comparer les comportements de bassins semblables situés dans des zones climatiques différentes.

■ Le rôle des açudes dans l'hydrologie.

Le nombre actuel des açudes dans le Nordeste est tel que l'on peut considérer qu'ils font maintenant partie du "*milieu naturel*". Leur construction s'effectue de manière anarchique, avec un rythme accéléré. Il est donc urgent de mieux comprendre, intégrer et gérer régionalement ces réservoirs. Pour cela, il faut étudier plusieurs aspects de leur influence :

- * Connaître leur nombre, leur densité, la distribution de leur taille, etc. On utilisera avantagement les facilités offertes par la télédétection. Ainsi, par exemple, une image prise après une saison des pluies excédentaire permettra de connaître les tailles maximales des miroirs d'eau de tous les açudes qui débordent. Une image prise après une période de plusieurs mois sans précipitation, dont on connaît l'évaporation, fournira une première estimation des coefficients d'ouverture définis par MOLLE (1991) et donc du volume stocké.

* Une modélisation du fonctionnement de grands bassins doit indiquer les densités régionales d'açudes à ne pas dépasser, densité maximale qui varie selon le critère adopté.

* Enfin, il est nécessaire d'améliorer les normes de dimensionnement des açudes.

■ L'estimation des débits de pointe des crues.

La formule de débit de crue que nous proposons est une enveloppe supérieure assez grossière des débits de pointe. Comment améliorer la précision de cette formule ? Le débit de pointe est fonction des deux coefficients K_x et L_e .

- Le coefficient K_x est sans doute celui dont on peut améliorer la précision le plus rapidement. Il peut s'exprimer en fonction du temps de base. Pour essayer de trouver des facteurs explicatifs du temps de base (forme du bassin, relief, rugosité du lit, etc.) on peut enregistrer la forme des limnigrammes du plus grand nombre de rivières possible et déterminer directement leurs temps de base, sans avoir à étalonner les stations, qui est l'opération la plus coûteuse.
- Il arrive, malheureusement, qu'une saison des pluies très excédentaire provoque la rupture de nombreux açudes dans une région. L'étude des causes de rupture, l'estimation de la fréquence des crues et des débits maximaux peut aussi aider à améliorer la précision des formules.
- On observe, trop souvent, des ruptures d'açudes "en cascade". Il serait souhaitable d'adapter et de simplifier les méthodes théoriques de calcul de propagation de crues brutales, pour mieux contrôler ce type de phénomène. Ceci doit être mené de pair avec une étude de l'amortissement des crues dans les retenues.

■ Transport de matières.

Il existe très peu de données sur les variations des concentrations en matière dissoute, en suspension ou charriage, en fonction du temps et du type du sol et du sous-sol du bassin.

Deux types d'action peuvent être entrepris concernant les transports en matière dissoute.

- Un échantillonnage systématique des eaux des retenues permet une comparaison de la qualité de l'eau avec le type de bassin. On utilisera, avec avantage, des mesures réalisées après une saison de pluie abondante qui aura "lavé" les sels préalablement contenus dans ces barrages. Dans ce cas, la salinité ne devrait pas être très différente de sa moyenne annuelle.
- Un suivi des variations de la charge chimique des eaux au cours de l'année est nécessaire pour la modélisation de la qualité des eaux des retenues.

En ce qui concerne les transports de matières solides, des mesures sur parcelles d'érosion et sur le réseau général, sont bien sûr nécessaires.. On pourra, avec avantage, effectuer le cubage des sédiments piégés dans des açudes dont on connaît la date de construction et la nature physiographique du bassin d'alimentation. On aura intérêt à étudier des açudes surdimensionnés.

■ Techniques de modélisation.

En hydrologie, les modèles constituent un instrument qui, bien utilisé, permet de valoriser au maximum les données recueillies. Ils permettent, en particulier, de corriger les anomalies climatiques de la période d'observation, qui est généralement trop courte. Ils permettent également de simuler des conditions extrêmes (crues, sécheresses).

Les mesures de terrain devraient être conçues pour répondre aux questions des modélisateurs ou pour valider leurs modèles. Il peut s'agir, par exemple, de mesures hydrodynamiques sur le profil pédologique, de mesure sur grand bassin ou encore de calage de "signatures" d'image satellite.

Un effort doit également être fait dans l'amélioration des techniques de calage et de la conception des modèles.

Les modèles qui utilisent le concept de discrétisation spatiale sur les grands bassins pourront utiliser, avec avantage, les résultats obtenus sur les bassins représentatifs.

■ Organisation de la recherche.

Nous avons indiqué quelques exemples de recherches concernant spécifiquement l'hydrologie des petits bassins. D'autres recherches tout aussi urgentes peuvent permettre d'améliorer la connaissance et la gestion des ressources en eau de cette région du globe beaucoup trop souvent atteinte par des **sécheresses** ou des **inondations catastrophiques**.

Il faut, tout d'abord en connaître les ressources, par la réhabilitation d'un **réseau de mesures hydrométriques**, qui n'est plus que l'ombre de lui-même. Il faut aussi connaître les ressources et prévoir leur évolution en utilisant les techniques de **téledétection** et les perspectives offertes par la **prévision climatique** à toutes les échelles de temps.

Pour rendre ces recherches opérationnelles, il est indispensable d'établir clairement des **priorités** à moyen et à long termes. Il faudra aussi instituer les **mécanismes institutionnels qui garantissent** les ressources humaines et matérielles pour toute la durée des programmes choisis.

ANNEXES

Annexe 1 : Méthode de transposition hydrologique, proposée dans le "Manuel du Petit Açude"

Annexe 2 : Information existante sur les autres bassins représentatifs

Annexe 3 : Liste et qualité des pluviomètres sélectionnés

Annexe 4 : Fonctionnement du modèle SUDENE/ORSTOM avec des pluviométries africaines.

Annexe 5 : Glossaire

Bibliographie

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

A N N E X E 1
METHODE DE TRANSPOSITION
HYDROLOGIQUE
proposée dans le "Manuel du Petit Açude"

Açude est le nom donné dans le Nordeste du Brésil, aux barrages de toute taille. On estime, dans cette région, le nombre de petits açudes à plus de soixante-dix mille. Ce sont en général des petites retenues collinaires en terre qui émaillent le paysage et qui sont le plus souvent dimensionnées et construites de manière très empirique. Le potentiel que représente ces açudes est très mal utilisé. Le chapitre dimensionnement du "Manual do pequeno açude" (F. MOLLE et E. CADIER, 1991) propose une méthode de calcul de la hauteur du barrage, de la largeur du déversoir et de la surface du périmètre d'irrigation, en fonction du potentiel hydrologique du bassin versant d'alimentation, des caractéristiques du site de la retenue et de l'utilisation prévue de l'aménagement.

Ce calcul de dimensionnement comporte plusieurs étapes dont la première consiste, évidemment, à estimer les caractéristiques hydrologiques du bassin versant d'alimentation. Nous allons présenter quelques extraits de la méthode de transposition proposée dans ce manuel, qui constitue une application directe de ce qui a été exposé dans les chapitres précédents.

Cette méthode a été conçue pour les des ingénieurs et techniciens responsables des petits projets d'aménagements rural, *qui sont, le plus souvent non spécialistes en hydrologie*. Pour qu'ils l'utilisent, nous avons du introduire un certain nombre de simplifications aux résultats que nous avons présentés dans ce mémoire.

1. EVALUATION DU VOLUME ANNUEL ECOULE

Le calcul du volume écoulé annuel moyen V_e est effectué à partir des éléments suivants :

- la surface du Bassin Versant d'alimentation (BV) ;
- la classification hydrologique ou plutôt "hydropédologique" du bassin ;
- le total pluviométrique annuel et la zone climatique.

La classification du bassin requiert la détermination du coefficient L_{600} du bassin. Ce coefficient L_{600} correspond, rappelons-le, à la lame écoulée moyenne interannuelle que l'on observerait si le bassin était situé sous l'isohyète 600 mm dans la grande zone climatique "Sertão" que nous avons définie au paragraphe 4.3. Son calcul s'effectue en deux étapes :

- Estimation du coefficient L_{600} brut (ou standard), grâce à une classification hydro-pédologique du bassin utilisant les cartes de sol qui couvrent tout le Nordeste .
- Estimation d'un certain nombre de facteurs de correction (CV, CA, CL) permettant de traduire les modifications apportées au L_{600} brut, par d'éventuelles anomalies de la végétation, du relief, de la présence d'açudes à l'intérieur du bassin etc., pour obtenir le coefficient appelé L_{600} corrigé.

1.1 CLASSIFICATION HYDRO-PEDOLOGIQUE DU BASSIN : DETERMINATION DE L_{600} BRUT

La lame ou le coefficient L_{600} brut est déterminé à partir des caractéristiques des sols du bassin.

Les sols peuvent être définis de deux façons :

- Par les Unités Pédologiques (UC) définies dans les légendes des cartes du relevé pédologique de base édité par l'EMBRAPA, qui couvre tout le Nordeste, mais dont la précision peut se révéler insuffisante pour de petits bassins.
- Par les Types de Sols (TS) que l'on peut identifier sur le terrain ou à partir de cartes pédologiques plus détaillées que celle du relevé de base de l'EMBRAPA.

Deux cas peuvent se présenter :

- Quand le bassin se trouve dans une seule UC ou est constitué d'un seul TS, la lame L_{600} sera directement extraite des tableaux A ou B que l'on trouvera ci-après :
- Quand le bassin contient plus d'une UC ou d'un TS, appliquer l'une des deux formules qui effectuent une moyenne pondérée des L_{600} par sa surface :

Dans le cas des UC, utiliser le tableau A, pour appliquer la formule suivante :

$L_{600} \text{ brut du bassin} =$ première UC $+ L_{600}(\text{UC2}) * S(\text{UC2})/S$ $+ \text{etc...}$	$L_{600}(\text{UC1}) * S(\text{UC1})/S \quad (\text{pour la}$ $\text{pour la deuxième UC})$ $(\text{pour les UC suivantes})$
---	--

Dans le cas des TS, utiliser le tableau B pour appliquer une formule du même type :

$L_{600} \text{ brut du bassin} = L_{600}(\text{TS1}) * S(\text{TS1})/S + L_{600}(\text{TS2}) * S(\text{TS2})/S + \text{etc...}$
--

S(UC1), S(TS1) etc, sont les surfaces des différents UC ou TS qui se trouvent dans le bassin ; S correspond à la surface totale du bassin.

Utilisation du tableau A

Nous présentons une version résumée du tableau A qui permet d'évaluer la lame L_{600} brute des principaux types de sols (TS) existants dans le Nordeste semi-aride. Il existe une version complète de ce tableau A qui est beaucoup plus longue et qui propose une liste exhaustive des UC de toutes les cartes pédologiques de l'EMBRAPA.

TABLEAU A (version résumée)
Tableau A1.1 Aptitude à l'écoulement des principaux sols du Nordeste semi-aride

TYPE DE SOL (TS) Nom	Caractéristiques additionnelles	L ₆₀₀ brut (mm)	% DU NE Semi-aride
Brun non calcique et lithosolique	* vertique	37mm 25	25.5% 3.2
Affleurement de roche		90	3.3
Podzolique de texture sableuse à moyenne		15	5.7
.....moyenne/argileuse ou moyenne/plintique		25	3.5
...de texture argileuse ou sol peu épais		37	4.2
Vertisol	*	25	1.3
Cambisol de texture moyenne à argileuse		15	1.8
.....argileuse ou sol peu épais		37	2.1
Solonetz Solodisé	*	125	3.5 SEL
Planosol Solodique	*	70	7.9 SEL
Sables	*	0	11.1
Régosol	avec fragipan	5	2.5
Latosol	*	5	15.1
Latosol de texture	moyenne à argileuse	10	2.8
Latosol de texture	argileuse	15	2.3

* Quand le sol ne présente aucune des caractéristiques additionnelles mentionnées dans les autres lignes du tableau.

Type de Sol

Dans ce tableau A, un **Type de Sol** est défini par le **nom du sol** (par exemple : Brun Non Calcique) et par ses **caractéristiques additionnelles** qui indiquent les principales variétés du sol considéré que l'on peut rencontrer.

Caractéristiques additionnelles :

Elles peuvent être regroupées de la façon suivante :

- **Texture** : elle indique la proportion d'argile, de sable et de silt. La texture est directement liée à la perméabilité et à l'écoulement du sol.
- **Épaisseur** : les sols peu épais, érodés ou tronqués coulent d'avantage car ils retiennent moins l'eau.
- **Blocage à l'infiltration** : La présence de couches imperméables ou de croûtes superficielles empêche l'infiltration et favorise l'écoulement. Les pellicules de battance, les fragipans et les couches plinthiques constituent, par exemple, des couches de blocage.
- **Salinité** : la salinité des sols est toujours un facteur qui accentue l'écoulement, car les sels ont tendance à imperméabiliser le sol.

Ce tableau A permet une évaluation globale de l'importance relative des différentes catégories de sol de notre classification :

- **Les sols aptes sans restriction pour le captage du ruissellement** :
Ce sont des sols dont la valeur de L_{600} est égale ou supérieure à 37 mm, mais qui ne sont pas solodiques. Ces sols couvrent 32 % de la surface totale du Nordeste semi-aride. Si l'on ne considère que la région cristalline, région ne possédant que très peu de ressources en eau souterraine, cette proportion augmente jusqu'à 65 %. Il s'agit principalement de sols bruns non calciques, de lithosoliques et d'affleurements de roche.
- **Sols utilisables, à la rigueur, mais dont l'écoulement est insuffisant** :
15 % du Nordeste semi-aride est recouvert de sols qui peuvent encore être considérés comme aptes à capter de l'eau pour des açudes, malgré des écoulements faibles et irréguliers (L_{600} entre 15 et 37 mm). Il s'agit principalement des sols podzoliques et des cambisols.
- **Sols présentant des problèmes de salinisation** :
Une proportion notable du Nordeste semi-aride (11 %) présente des problèmes de salinisation ; ce sont surtout les solonetz ou planosols solodiques.
- **Sols inutilisables pour le captage du ruissellement** :
35 % du Nordeste est recouvert de sols impropres à la construction d'açudes. En effet, ces sols présentent des écoulements dérisoires et très irréguliers. Ce sont des formations sableuses, les régosols et la majorité des latosols, situés surtout sur des sous-sols sédimentaires.

Utilisation du tableau B :

Le tableau B contient une liste exhaustive des L_{600} des diverses UC existantes sur toutes les cartes de reconnaissance de sols de l'EMBRAPA, pour le Nordeste semi-aride. Nous ne fournissons qu'un court extrait de ce tableau qui occupe plusieurs pages.

TABLEAU B (extrait)

Tableau A1.2 : Valeurs en mm des L_{600} brut des UC de l'Etat du PERNAMBUCO.

UMP	L600	UMP	L600	UMP	L600	UMP	L600	UMP	L600	UMP	L600
Ae1	44	LVe4	11	PE7	37	PL5	58	Re5	46	REe4	36
Ae2	75	LVe5	8	PE8	11	PL6	62	Re6	32	REe5	66
AQ	0	LVe6	12	PE10*	15	PL7	48	Re7	62	REe6	32
AQd1	0	NC1	37	PE11	36	PL9*	63	Re8	38	REe7	40
AQd2	1	NC2	34	PE16	37	PL10	62	Re9	63	REe8	37
Ce1*	22	NC3	31	PE18	37	Rd1	37	Re10	63	SS1	125
Ce2	21	NC4	30	PE19	12	Rd2	18	REd2	5	SS2	68
Ce3	5	NC8	31	PE20	22	Re1	37	REd3	32	SS3	74
LVd9	15	NC9	49	PL1	70	Re2	34	REe1	5	V1	25
LVd12*	5	PE1*	37	PL2	60	Re3*	64	REe2	32	V2	25
LVe2	18	PE5	31	PL3	54	Re4	34	REe3	18	V3	65
LVe3	14	PE6*	37	PL4	53						

* Attention cette UC peut être située hors de la zone semi-aride

Quelle est la différence entre les UC et les TS ? Quand doit-on utiliser le tableau A ou le tableau B ?

Les cartes de sol de reconnaissance de l'EMBRAPA : les UC

L'EMBRAPA a élaboré les cartes pédologiques de reconnaissance pour chaque Etat du Nordeste. Les échelles de ces cartes varient entre le 1:400.000^{ème} et le 1:1.000.000^{ème}.

Sur ces cartes, les sols sont regroupés en associations appelées Unité [de cartographie] Pédologique (UC). Les légendes de ces cartes indiquent quels sont les Types de Sols (TS) qui composent chaque UC et quelle est leur proportion moyenne régionale à l'intérieur de chaque UC.

La précision de ces cartes est limitée, vu leur échelle. Les proportions réelles des TS sur le bassin étudié peuvent être différentes de celles définies régionalement pour chaque UC. Ceci s'aggrave pour les plus petits bassins, puisque 1 cm sur ces cartes correspond, sur le terrain, à une distance de 4 à 10 km, suivant l'échelle.

Quel autre type d'information peut-on trouver ?

- Dans plusieurs parties du Nordeste, il existe des cartes de sols plus détaillées que celles de l'EMBRAPA. Il faut toujours rechercher ce genre de documents dans les divers organismes publics ou privés susceptibles d'avoir étudié les sols d'une région.

- Quand on le peut, il faut effectuer un relevé ou une reconnaissance pédologique du bassin. Ce relevé est toujours nécessaire quand le bassin a une surface inférieure à 10 km².

Il est évidemment toujours préférable, quand cela est possible, d'utiliser les TS qui fournissent une information plus précise et spécifique du bassin étudié.

1.2 CORRECTIONS DE L₆₀₀

La valeur finale ou corrigée de L₆₀₀ est calculée par la formule :

$$L_{600} \text{ corrigée} = L_{600} \text{ brut} \times CV \times CA \times CL$$

Où :

- CV est le facteur correctif de végétation
- CA est le facteur correctif de présence d'âçudes en amont.
- CL est le facteur correctif de présence de zones de rétention d'eau (sols sableux dans le lit des rivières et dans les parties basses des versants).

Ces corrections sont effectuées en fonction de critères d'appréciation plus subjectifs que dans l'étape antérieure, qui rendent indispensable une visite de terrain et requièrent une certaine expérience de la méthode.

Important : Pour des bassins "normaux", tous ces facteurs correctifs valent 1. On ne doit réaliser ces corrections que si l'on détecte de fortes anomalies.

1.2.1. Influence de la couverture végétale (Facteur CV)

Les valeurs de L₆₀₀ brut proposées dans le paragraphe antérieur correspondent à des situations moyennes (ou centrales) de la couverture végétale, dans les conditions actuelles de cette partie semi-aride du Nordeste. Ces conditions sont, en fait, intermédiaires entre une couverture vierge et un déboisement total.

On doit surtout considérer le degré de protection de couverture du sol et d'interception de la pluie assuré par la végétation. Ainsi, un pâturage en bon état, c'est à dire, celui où les plantes forment une couche fermée qui protège totalement le sol, doit être considéré comme un sol "bien" ou même "extrêmement bien" conservé, car ce pâturage sera pratiquement équivalent, en termes d'interception de la pluie, à une caatinga native. Les zones de sol nu, dépourvues de couverture végétale et dont la surface est lisse ou compactée, doivent être considérées, au contraire, comme extrêmement dégradées.

Dans le cas d'un petit bassin et pour les groupes de sols dont le L_{600} est compris entre 20 et 50 mm, c'est à dire la majorité des sols des bassins qui alimentent les açudes, nous proposons de multiplier la valeur de L_{600} de référence par un facteur de correction CV, qui peut varier entre 0,5 et 2, selon le degré de conservation ou de détérioration de la végétation. Cependant, nous recommandons de ne pas utiliser de valeurs de CV inférieures à 0,75 ou supérieures à 1,5, sauf dans les cas extrêmes.

Tableau A1.3 Valeurs du facteur de correction CV

Etat de la couverture végétale	Extrêmement bien conservée	Bien conservée	Occupation normale	Très dégradée	Extrêmement dégradée
L_{600} compris entre 20 et 50 mm L_{600} inférieur à 20 ou supérieur 50mm	0,5 (0,75)	0,75 (0,9)	1	1,5 (1,25)	2 (1,5)

1.2.2. Présence d'açudes en amont du site de la retenue (Facteur CA)

Densité d'açudes dans les conditions standard ou de référence.

Le facteur correctif d'açude CA dépendra du nombre et de la taille des açudes déjà existants sur le bassin d'alimentation.

CA varie normalement entre 1 et 1,6, mais il peut être exceptionnellement inférieur à 1, quand le nombre et le volume des açudes situés en amont sont anormalement élevés, ou que l'on se trouve, par exemple, immédiatement en aval d'un gros açude. Dans ce cas, il faut réaliser une étude spécifique.

Les valeurs de L_{600} proposées ont été établies pour les conditions actuelles des grands bassins du Sertão, dans lesquels on peut estimer que les açudes contrôlent, en moyenne, 30 à 50 % de la surface (Sa/S entre 0,3 et 0,5), avec une capacité totale de l'ordre de 25 à 50 % du volume naturel moyen écoulé. Dans ce cas, il ne faut pas faire de corrections et CA vaut 1.

Tableau A1.4 Valeurs du facteur de correction CA

Densité d'Açudes	Très forte : supérieure à 0,5 ac/km ² ou présence de très grands açudes*	Normale**	Nulle
Sa/S	> 0,55	entre 0,35 et 0,55	0
Coefficient de Correction CA	< 1	1	1,6

* Nécessité de réaliser une étude spécifique,

** Volume total des açudes de l'ordre de 40 % de l'écoulement annuel ; densité entre 0,25 et 0,5 açude par km², ou (Sa/S) entre 0,3 et 0,5. Sa est la somme des surfaces des bassins contrôlés par les açudes situés en amont.

Soulignons la nécessité de multiplier par CA=1,6 les lames L_p , pour de petits bassins situés près des sources, quand ils sont totalement dépourvus d'açudes ou de tout petits barrages.

1.2.3. Présence de dépressions et de zones de rétention de l'écoulement (coefficient CL)

Des dépressions, des zones alluviales ou des bancs de sable peuvent retenir une importante partie de l'écoulement, surtout quand ils sont situés sur le passage de l'eau, c'est à dire, dans la partie basse des toposéquences ou près du lit des rivières.

On a identifié trois types principaux de rétention ou d'absorption de l'écoulement¹ :

- Présence, dans la partie basse des toposéquences, de zones de sol épais et perméable. La toposéquence de JUATAMA indiquée au paragraphe 3.4.2.2. peut être donnée en exemple.
- Lits de rivières traversant des zones alluviales sableuses et perméables de grande surface. A titre indicatif, quand ces zones alluviales atteignent 1 à 2 % de la surface totale du bassin, on estime CL à 0,9. Pour 4 % du bassin CL s'abaisse à 0,8.
- Lits de rivières passant par des dépressions, d'anciens lacs ou des zones sans relief susceptibles d'infiltrer, retenir ou stocker un important volume d'eau.

L'appréciation du coefficient CL est très subjective et demande une grande expérience de l'évaluation du fonctionnement hydrologique global du bassin, de celui des diverses toposéquences et de la capacité du réseau de drainage à stocker une partie des écoulements qu'il véhicule.

Quand on identifie clairement la présence d'un ou plusieurs de ces mécanismes de rétention d'eau, il est nécessaire d'appliquer un coefficient correctif CL différent de 1, en accord avec le tableau suivant :

Tableau A1.5 Facteur de correction CL

IMPORTANCE MECANISME DE RETENTION	très élevée	Elevée	Normale	faible ou nulle
Facteur CL	0.8	0.9	1	1.2

Dans certains cas de rétention très importante, le coefficient CL peut exceptionnellement s'abaisser en dessous de 0,8. Dans ce cas, son évaluation nécessitera une étude spécifique.

Quand il n'existe aucune zone de rétention importante sur le passage de l'eau, il faut appliquer un coefficient CL de 1,2. Ce coefficient ne doit pas dépasser cette valeur.

Important : Dans une région homogène, les coefficients CL seront plus élevés sur les très petits bassins qui sont dépourvus, en général, de zones alluviales .

¹ Mis à part la rétention directe de l'eau dans le sol (ou dans le profil pédologique), à l'endroit où la pluie tombe. Cette rétention a déjà été intégrée à la valeur de L_{600} définie pour chaque TS ou UC.

1.3 EVALUATION DE LA PLUVIOMETRIE

Détermination du total annuel moyen des précipitations

L'estimation de la pluviométrie annuelle est très importante : chaque 100 mm de pluie supplémentaire provoque une augmentation de 40 % de l'écoulement.

Il est inutile de reproduire ici les conseils pratiques donnés pour l'évaluation du total annuel moyen des précipitations P sur le bassin ou l'UC. Cette évaluation doit être effectuée à l'aide d'une carte d'isohyètes. Ces cartes existent pour tout le Nordeste à l'échelle du 1/2.500.000ème et 1/1.000.000ème (MOLINIER 1991).

Détermination de la zone climatique et du coefficient de correction climatique C

La délimitation de la zone climatique doit être faite en utilisant la figure 4.3.4.

Le coefficient climatique C vaut 1 dans le centre de la zone "SERTAO" et 0,5 dans le centre de la zone "TRANSITION".

On admet que le coefficient C varie progressivement de 1 jusqu'à 0,5, quand on passe d'une zone à l'autre. Cette "bande" intermédiaire a une largeur approximative de 50 km. Dans cette bande on calculera C en supposant une variation continue et linéaire de C entre ces deux zones.

1.4 CALCUL DE LA LAME ECOULEE L(P)

La lame partielle $L(P(i))$ de chaque Unité Pédologique $UC(i)$ peut être calculée à partir de son $L_{600}(i)$ corrigé, de la précipitation moyenne $P(i)$ et du facteur climatique C .

Le calcul utilise l'abaque de la figure A1.1 ou la formule suivante :

$$L(P(i)) = L_{600}(i) \text{ corrigée} \times C \times e^{A(P(i) - 600)}$$

Le coefficient A vaut normalement 0,0033

Tableau A1.6 Valeurs du coefficient A

bassin avec $L_{600} < 15\text{mm}$	Cas Général	bassin avec $L_{600} > 60\text{mm}$
0,0040	0,0033	0,0025

$L(P)$ est ensuite donné par la formule :

$$L(P) = \sum (L(P(i)) * S(i)/S)$$

1.5 CALCUL DU VOLUME MOYEN ECOULE

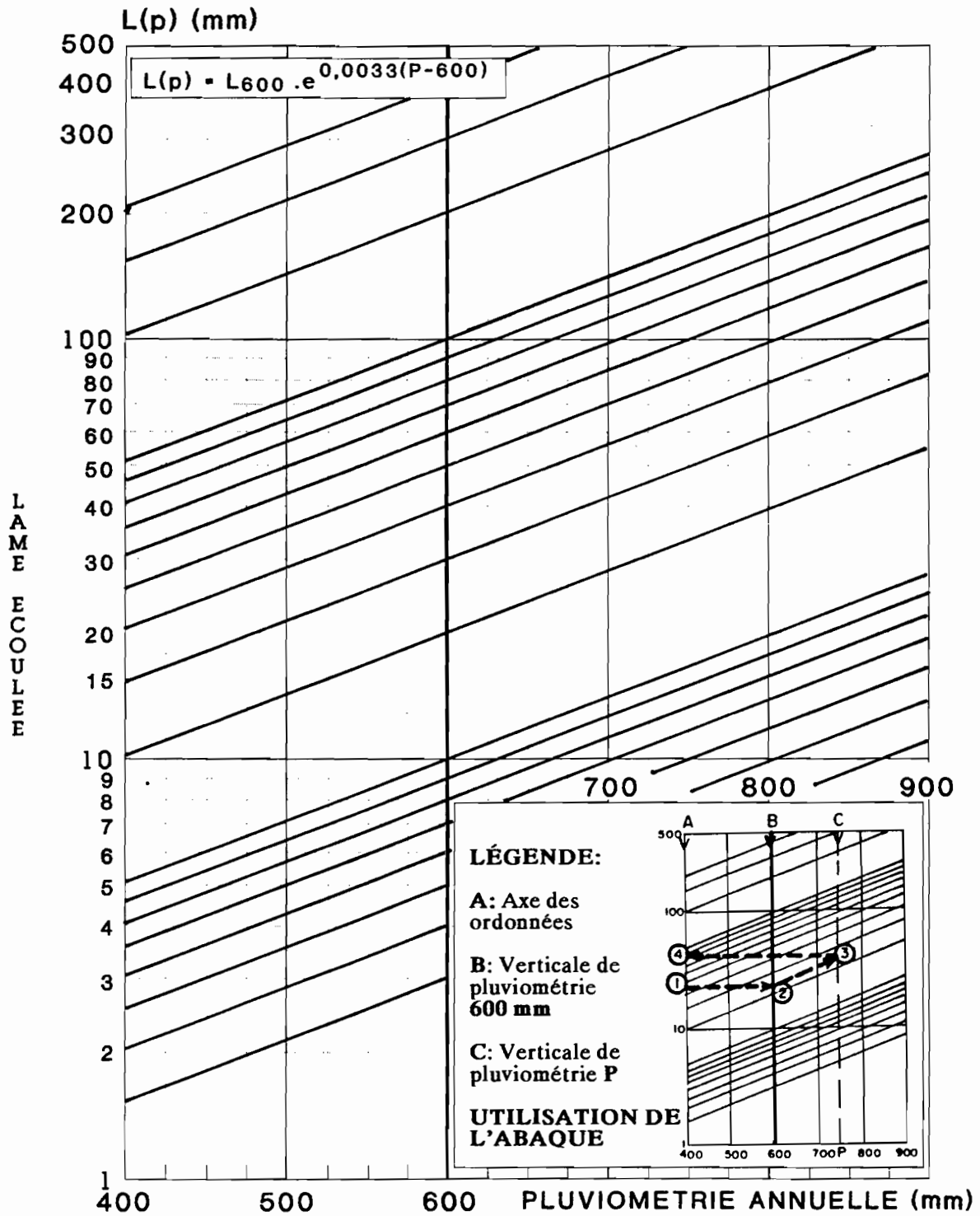
Le volume écoulé moyen annuel V_e (en m^3) est calculé par la formule :

$$V_e = S \times L(p) \times 1000$$

où : S est la surface du Bassin Versant en km^2

$L(p)$ est la lame écoulée moyenne en mm qui est la moyenne pondérée $S(i)$ par la surface des $L(Pi)$ des diverses unités du bassin.

CALCUL DE LA LAME ECOULEE ANNUELLE L(p)



Etapes de l'utilisation de l'abaque:

- (1) Reporter la valeur de L_{600} sur l'axe des ordonnées.
- (2) Reporter horizontalement cette valeur jusqu'à la verticale de pluviométrie $P = 600$ mm.
- (3) Suivre une parallèle aux droites inclinées jusqu'à ce que l'on rencontre la verticale de pluviométrie P recherchée.
- (4) Retourner sur l'axe des ordonnées pour obtenir la valeur de $L(P)$ en mm.

Cet abaque peut être utilisé pour les valeurs de P comprises entre 400 et 900 mm.

Figure A1.1 Abaque de calcul du coefficient L_{600}

2. CALCUL DU DEBIT MAXIMUM ADMISSIBLE DANS LE DEVERSOIR

Notre Manuel propose une méthode de calcul du débit maximum admissible dans le déversoir. Ce débit correspond au débit de pointe dont la période de retour est estimée entre 100 et 200 ans.

Pour de plus grands barrages ou quand la rupture de l'açude constitue une grave menace pour la vie des populations situées en aval, nous recommandons d'augmenter de 50 % la valeur du débit maximum admissible dans le déversoir du projet.

Le calcul du dimensionnement du déversoir est divisé en trois parties :

- calcul du débit de pointe de la crue de projet ou débit naturel de crue à l'endroit du barrage, sans prendre en compte l'influence de l'açude.
- calcul de l'amortissement de la crue par la future retenue
- évaluation du risque de rupture des retenues situées en amont.

Nous ne présenterons que la partie du manuel qui concerne le débit de pointe de la crue de projet.

Formules de calcul de la crue de projet :

Pour calculer le débit de pointe de la crue de projet, il faut appliquer une des deux formules suivantes :

$Q_x = 25 (S_c)^{0,58} * F_c$	pour $S_c > 5 \text{ km}^2$
$Q_x = 17 (S_c)^{0,80} * F_c$	pour $S_c < 5 \text{ km}^2$

F_c est un facteur de correction et S_c est la surface de contribution de crue. Ces deux paramètres sont définis plus loin. Le tableau A1.7 et la figure A1.2 fournissent les valeurs de Q_x pour $F_c=1$.

Tableau A1.2 Débit de la crue de projet en fonction de la surface, pour $F_c=1$

S(km ²)	0,1	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	500
Q(m ³ /s)	2,7	9,8	17	30	62	95	142	242	361	540	920

2.1 CALCUL DE LA SURFACE DE CONTRIBUTION DE CRUE SC (KM²)

- Calculer la surface S1 couverte de sols pour laquelle $L_{600} < 4$ mm.
- Calculer la surface S2 couverte de sols pour laquelle $4 < L_{600} < 30$ mm
- Calculer la surface S3 couverte de sols pour laquelle $L_{600} > 30$ mm

Sc est ensuite calculé par la formule :

$$Sc = 0,1 S1 + 0,5 S2 + S3$$

Important : Quand le bassin ne contient que des sols où L_{600} est supérieure à 30mm, ce qui est souvent le cas dans les zones dont le sous-sol est cristallin, ou quand on ne connaît pas les groupes de sols du bassin, prendre Sc égal à S.

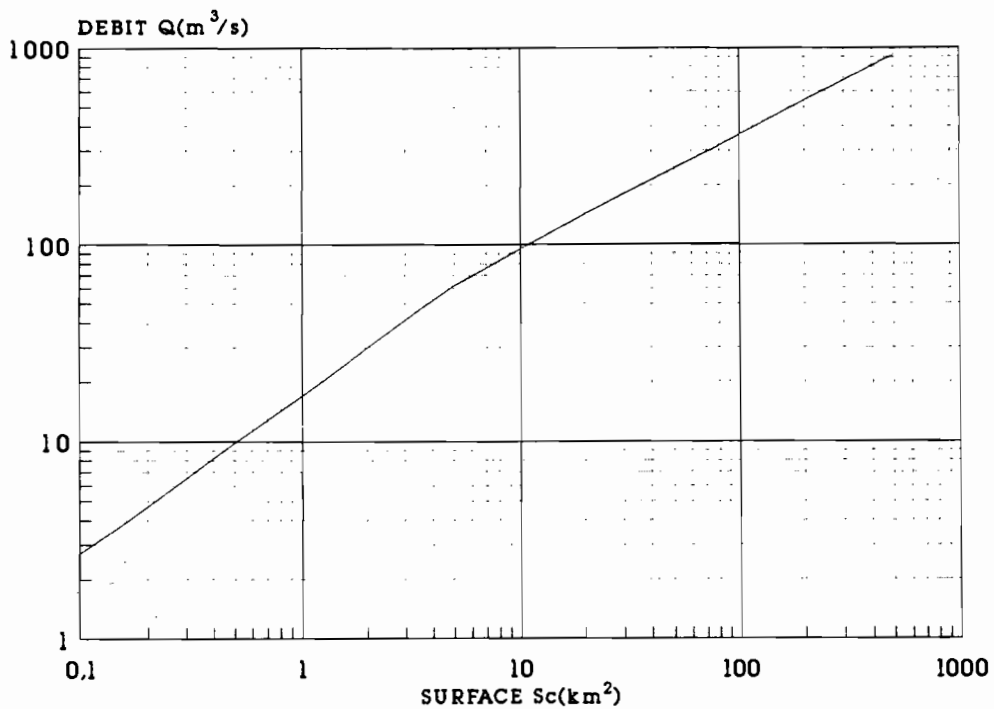


Figure A1.2 Abaque de calcul du débit maximum, en fonction de la surface de contribution de crue $Q_x = f(S_c)$

2.2 CALCUL DU FACTEUR CORRECTIF FC

Fc est un facteur de correction pouvant varier entre 0,5 et 1,2 qui intègre des corrections dues aux facteurs suivants :

- **forme et contour** du bassin versant d'alimentation (Coefficient C_{form}) ;
- **forme du réseau de drainage** (Coefficient C_{dren}) ;
- **relief** (Coefficient C_{rel}) ;
- existence de **zones particulièrement dégradées**, susceptibles de présenter des sols compactés et presque **imperméables** (Coefficient C_{degr}) ;
- **conditions climatiques** spécifiques du microclimat du bassin (Coefficient C_{clim}).

Important : Dans des conditions normales et dans la zone climatique du Sertao, tous les coefficients correctifs présentés dans ce chapitre ont la valeur 1. Il ne faudra effectuer une correction que lorsque le bassin présente des caractéristiques très spéciales.

a) Influence de la forme du bassin versant : le facteur C_{form} .

Il faut déterminer sur la carte la longueur L de la plus longue rivière et la surface S du bassin. Le tableau suivant fournit les valeurs du coefficient C_{form} qu'il faut appliquer.

Tableau des valeurs du facteur C_{form}

L^2/S	1	2	3	4	5	6	7
Coefficient de Gravelius	1,12	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
C_{form}	1	1	0,85	0,75	0,70	0,65	0,63

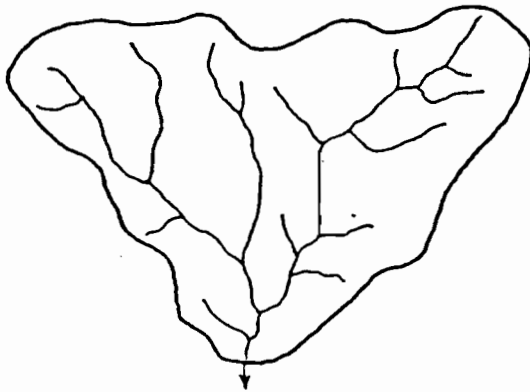
b) Influence de la forme du réseau de drainage : le coefficient C_{dren} .

On peut signaler deux types spéciaux de configuration du réseau de drainage susceptibles d'altérer le coefficient C_{dren} :

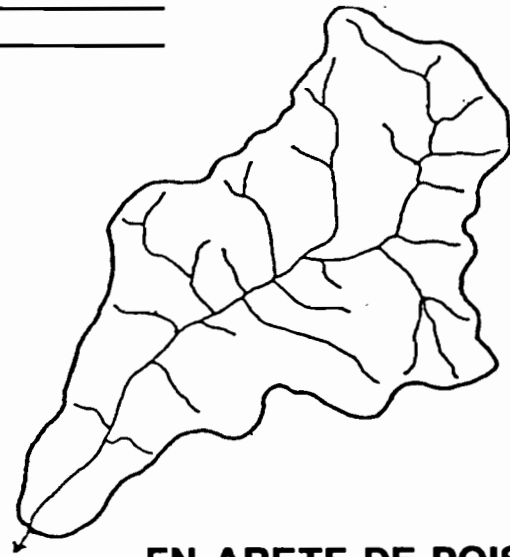
- 1) Réseau de drainage dit en "arête de poisson". Lorsque le talweg principal occupe une position centrale avec plusieurs affluents d'importance secondaire des deux côtés. Les crues de ce type de bassin sont moins dangereuses. C_{dren} peut être diminué, au maximum de 25 %, il variera donc, entre 0,75 et 1,0.
- 2) Réseau de drainage "radial". Lorsqu'un talweg principal est formé par la convergence de deux ou plusieurs cours d'eau d'égale importance qui se réunissent dans sa partie en aval. Les crues de ce type de bassin seront plus dangereuses. C_{dren} peut être augmenté au maximum de 25 %, il variera donc entre 1 et 1,25.

Tableau des valeurs du facteur C_{dren}

Aspect du réseau de drainage	Valeurs du coefficient C_{dren}
Normal	1
Arête de poisson	0,75 à 1
Radial	1 à 1,20



RADIAL



EN ARETE DE POISSON

Figure A1.3 Forme du réseau de drainage d'après RIBSTEIN .

c) Influence du relief du bassin : le facteur C_{rel}

Le facteur C_{rel} peut varier entre 0,6 et 1,1. Le relief de référence correspond au relief le plus fréquent dans le Nord-est, qui est un relief ondulé à fort avec pentes transversales de l'ordre de 10 à 15 % et longitudinales de 0,5 à 2 %.

Quand le relief est beaucoup plus fort (c'est à dire, montagneux ou escarpé), C_{rel} pourra s'élever jusqu'à 1,10 ou même, exceptionnellement, jusqu'à 1,20 si le lit des rivières est lisse et dépourvu de végétation car les coefficients de Manning sont faibles, ce qui accélérera l'évacuation des crues.

Tableau des valeurs du facteur C_{rel}

RELIEF	Montagneux et Escarpé	Fort à Ondulé	Ondulé Ondulé	Faible à	Plan
PENTES	> 25%	15 à 25%	15 - 8%	3 - 8%	0 - 3%
C_{rel}	1,1 à 1,2	1	1	0,8	0,6

d) Influence des zones de sols dégradés, compactés ou tronqués, ou de zones urbaines : Le coefficient C_{degr}

Les zones dégradées, généralement par l'action de l'homme, peuvent accroître sensiblement le volume écoulé, diminuer (peut-être) les temps de transfert et augmenter ainsi le débit de pointe et des crues. Ces zones très imperméables peuvent être couvertes de croûtes ("pellicules de surface"), de zones compactées par l'homme ou constituées de zones de sols "tronqués", c'est à dire dont les premières couches ont été déblayées par l'érosion.

La correction est proportionnelle à la partie du bassin réellement dégradée, S_{degr} .

$$C_{degr} = 1 + (F_{acr} S_{degr})$$

Le facteur F_{acr} dépend de la valeur de L_{600} brut du sol de la zone du bassin qui est dégradée.

Tableau de valeurs du facteur F_{acr}

Valeur de L_{600}	Valeur de F_{acr}
Inférieur à 30mm	1,0
Supérieur à 30mm	0,5

Important : Cette correction ne doit être effectuée que lorsque une partie importante du bassin (supérieure à 15 %) est effectivement dégradée. Des dégradations locales et peu étendues (routes, terrains de football) ne doivent pas être prises en compte.

Exemple

Un bassin composé de sols dont la lame L_{600} est supérieure à 30mm et qui présente des dégradations importantes sur une proportion $S_{degr} = 20\%$ de sa surface, aura un coefficient C_{degr} de 1,10, calculé de la manière suivante :

$$C_{degr} = 1 + F_{acr} \times S_{degr} = 1 + 0,5 \times 0,20 = 1,10$$

e) Corrections climatiques : le facteur C_{clim} .

Malgré la relative homogénéité, dans le Nordeste semi-aride, des caractéristiques des intensités et des fortes précipitations en 24 h, il existe des différences non négligeables des débits de crue suivant les régions.

Ainsi, dans la zone de transition on évalue le coefficient C_{clim} aux alentours de 0,75 à 0,80. On peut aussi rencontrer des microclimats qui correspondront à des valeurs de C_{clim} supérieures à 1, pouvant atteindre 1,1 à 1,2. en particulier dans le sud du Ceará et l'ouest de la Paraíba, qui correspondent à la zone climatique n°6 de la carte 4.3.1.

f) Calcul final du facteur de correction Fc

Fc est calculé par la formule :

$$FC = C_{\text{form}} \times C_{\text{dren}} \times C_{\text{rel}} \times C_{\text{degr}} \times C_{\text{clim}}$$

Fc ne peut être inférieur à $0,5 * C_{\text{clim}}$. Dans ce cas adopter : $Fc = 0,5 * C_{\text{clim}}$.

Fc ne peut être supérieur à $1,3 * C_{\text{clim}}$. Dans ce cas on admet : $Fc = 1,3 * C_{\text{clim}}$.

3. EXPLICATIONS COMPLEMENTAIRES. PORTEE ET LIMITES DE LA METHODE

Nous apportons ici quelques explications complémentaires destinées à l'utilisateur du Manuel.

3.1 EXPLICATIONS COMPLEMENTAIRES DESTINEES A L'UTILISATEUR DU MANUEL

3.1.1. Notion de facteur correctif

Chaque fois que possible, les résultats et les normes sont présentés de la façon suivante :

- a) Calcul d'une valeur moyenne de chaque résultat ou norme. Cette valeur moyenne (ou valeur standard ou centrale ou encore valeur de référence) correspond, en principe, aux conditions les plus fréquentes dans le Nordeste semi-aride.
- b) Prise en compte, si nécessaire, d'un ou plusieurs facteurs correctifs qui permettront de corriger la valeur moyenne, en fonction des caractéristiques locales.

Un facteur correctif corrige la valeur moyenne par la formule :

$$\text{VALEUR CORRIGEE} = \text{FACTEUR CORRECTIF} * \text{VALEUR MOYENNE}$$

Cette présentation a l'avantage d'être simple, dans la plupart des cas, parce que la valeur la plus fréquente des différents facteurs correctifs est, par définition, proche de 1.

L'utilisation de ce type de présentation² peut, par contre, se révéler plus délicate dans les cas extrêmes, quand les conditions locales sont très différentes des conditions moyennes. Ceci ne concerne cependant qu'une minorité de cas qui impliquent une ou plusieurs corrections importantes.

² Cette présentation revient, en fait, à supposer toutes les corrections linéaires et isotropes.

3.1.2. Limites d'utilisation de la méthode

La méthode proposée permet d'effectuer simplement les calculs de dimensionnement de petits açudes et périmètres. Il importe cependant d'en fixer clairement les limites d'utilisation.

- Domaine géographique d'utilisation

La partie hydrologique de la méthode a été conçue pour être utilisée dans la zone climatique semi-aride du Sertão Nord, pour des pluviométries inférieures à 800 mm, principalement pour des bassins situés dans la zone géologique cristalline.

La méthode sera utilisée avec une précision et une sécurité inférieures dans les zones suivantes :

- . Sertão Sud ;
- . Agreste et zone de transition ;
- . zones de pluviométrie comprise entre 800 et 1000 mm ;
- . zones géologiques sédimentaires.

Il faut absolument utiliser une autre méthode hydrologique quand la végétation n'est plus xérophile et/ou quand la pluviométrie moyenne est supérieure à 1000mm.

- Taille du bassin

La méthode a été conçue pour estimer les écoulements sur des bassins de taille comprise entre 0,1 et 500 km².

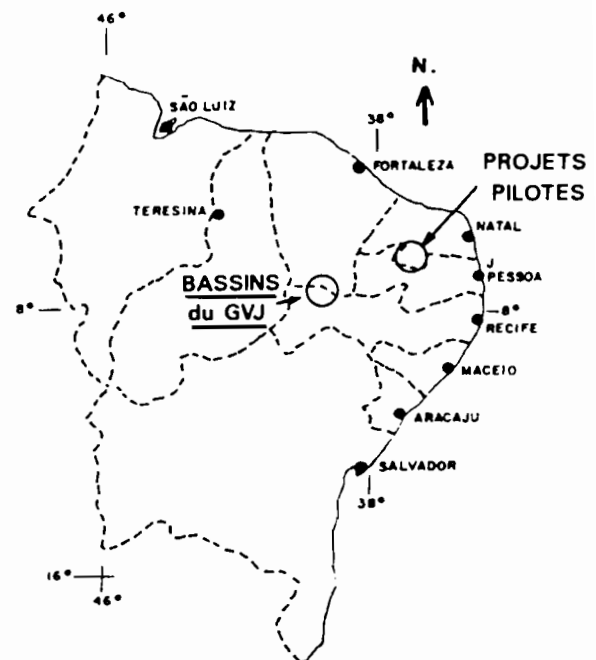
L'évaluation de L_{600} et des ressources en eau des bassins qui ont une surface comprise entre 10 et 500 km² est la plus facile. En effet, il suffit d'utiliser les UC définies sur les cartes pédologiques disponibles pour chaque Etat du Nordeste brésilien.

Le calcul devient plus délicat quand il s'agit de tout petits bassins de surface comprise entre 10ha et 10km². Il faut alors vérifier la proportion et les types de sols (TS) existants réellement sur le bassin et s'assurer qu'ils correspondent bien aux UC définies dans la légende de la carte pédologique. Car sur ces petits bassins, la diversité de la répartition des TS à l'intérieur de chaque UC rend très aléatoire l'utilisation directe des valeurs moyennes des écoulements de chaque UC.

La méthode d'évaluation des volumes moyens annuels que nous proposons, pourra être utilisée pour des bassins de taille supérieure à 500 km² à condition d'effectuer des vérifications complémentaires. Le calcul de la crue de projet et donc le dimensionnement du déversoir des grands barrages devra être, par contre, réalisé à l'aide d'une autre méthode, au dessus de 1000 km².

A N N E X E 2
INFORMATION EXISTANTE SUR LES AUTRES BASSINS
REPRESENTATIFS

Nous avons réuni, dans cette annexe, les données relatives à tous les "autres" petits bassins dont nous avons utilisé les informations hydrologiques, sans que nous ayons pu réunir toute l'information disponible pour les cinq bassins présentés dans le chapitre 3³. Un relevé des sols de tous ces "autres" bassins a été cependant systématiquement réalisé.



Ces bassins peuvent être regroupés en deux ensembles:

- Les bassins représentatifs du GVJ. Il s'agit des quatre bassins du BATATEIRAS, MISSAO VELHA, AÇUDE JARDIM et QUIXABINHA qui sont situés dans le Sud de l'Etat du Ceará, sur les contreforts du plateau de la CHAPADA DO ARARIPE. Ils ont été suivis pendant une période qui a varié de 1 et 3 ans, entre 1963 et 1965, par le Groupe d'étude du Val du Jaguaribe (GVJ) qui avait pour objectif principal de compléter rapidement l'information fournie par le réseau général, pour mieux cerner les différences de comportement existantes entre les parties du bassin du grand bassin du Jaguaribe situées sur le socle cristallin et celles situées sur un sous-sol sédimentaire. Nous avons extrait des rapports hydrologiques élaborés à cette époque (GVJ, 1965) l'information que nous présentons. Les cartes de sols de ces bassins ont été élaborées bien plus tard par J.C. LEPRUN (ASSUNÇDO *et al*, 1984). La carte A2.1 permet de situer ces bassins.
- Les açudes des "projets pilotes" du programme açude. Parmi les onze projets pilotes d'irrigation, suivis entre 1987 et 1991, trois seulement ont pu fournir une information hydropluviométrique dont la qualité s'est révélée suffisante pour assurer le calage de modèles de simulation hydrologique. Il s'agit des açudes MANOEL, JERICO et PEDRO COSTA, qui sont tous les trois, situés dans la région de Catolé do Rocha au Nord-Ouest de l'Etat de la Paraíba.

3 Il s'agit, bien sûr, des cinq ensembles de bassins représentatifs de TAUA, SUME, RIACHO DO NAVIO, JUATAMA et IBIPEBA.

CARACTERISTIQUES DES BASSINS

Caractéristiques morphométriques et pluviométriques des bassins

Le tableau A2.1 présente les caractéristiques morphométriques et le total pluviométrique annuel de tous ces bassins. Ils sont tous situés dans la partie Nord du Sertão, caractérisés par une seule saison des pluies par an, qui survient entre janvier et mai. Bien que situés à mi-chemin entre les bassins de TAUA et de SUME, ils bénéficient de précipitations nettement supérieures, dont la moyenne atteint ou dépasse 1000mm pour les bassins de MISSÃO VELHA et de BATATEIRAS, qui ne font plus vraiment partie de la zone semi-aride.

Tableau A2.1 Caractéristiques morphométriques et pluviométriques des bassins du GVJ et des projets pilotes.

BASSIN	SIGLE	SURFACE	VEGETATION	ACUDE	COMP	Ds	ALT	PLUIE
BATATEIRAS	RBP	203.20	2.	0	1.20	412	584	1100
MISSAO VELHA	RMV	323.50	2.	0	1.17	423	596.	850
ACUDE JARDIM	AJA	49.0	2.	0	1.40	300	700.	775
QUIXABINHA	QUI	85.60	2.	0	1.24	144	515.	775
MANOEL	MAN	2.35	3.	0	1.20	150	280.	830
JERICO	JER	0.41	2.	0	1.20	40	260.	830
PEDRO COSTA	PCO	0.09	3.	0	1.40	100	500.	830

Légende :

Végétation :

- . 2 : bien conservée,
- . 3 : plus de 30 % du bassins est cultivé.

Açude : 0 = aucun açude n'est recensé dans le bassin.

COMP : coefficient de Gravelius.

Ds : Dénivelée spécifique (m)

ALT : Altitude moyenne.

Caractéristiques des sols et de la végétation

Nous avons réuni ici les cartes et les tableaux présentant les sols de tous ces "autres" bassins ainsi que les résultats des mesures de perméabilité.

Les relevés de sols ont été réalisés en appliquant les protocoles utilisés pour les cinq bassins présentés au chapitre 3.

Ceux des bassins représentatifs du GVJ ont été élaborés par J.C. LEPRUN (ASSUNÇÃO *et al*, 1984) et ceux des "projets pilotes" par F. BARRETO. L'information concernant la végétation est plus fragmentaire.

Figure A2.1 Carte de situation générale des bassins représentatifs du GVJ

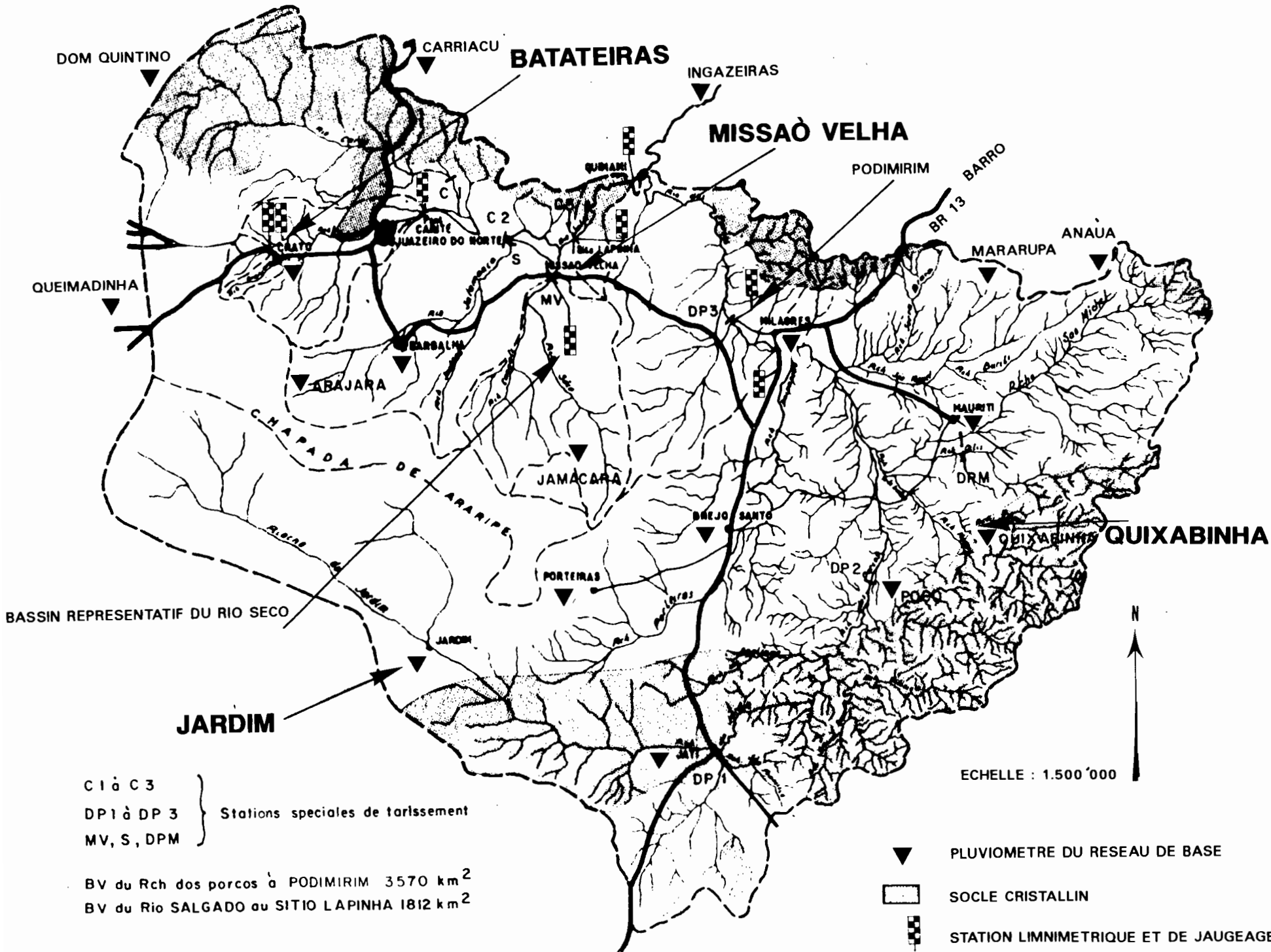


TABLEAU A.2.2 Bassin Représentatif de BATATEIRAS
Principales formations géologiques et type de sols

Formation Géologique	G RES	PERMEABLES	ALLUVIONS		
SOLS	Latosol rouge jaune distrophe	Association complexe de sols lithosoliques, podzoliques rouge jaune latosol rouge jaun- ne, verti- sols et massifs de roche.	Association de podzoli- ques rouge jaune eu- trophes et sables quartzeux distrophes	Association de sols podzoliques rouge jaune équivalent eutrophe et latosol rouge jaune sur alluvions	Sols al- luvion- naires eutro- phes.
ENGENDRES					
RELIEF	Nul à faiblement ondulé	Fort	Modéré à fort	Modéré à fort	Nul à faiblement ondulé
OCCUPATION DU SOL	Forêt : réserve forestière de l'IBDF	cultivé arbres fruitiers	Cultivé arbres fruitiers et non cultivé	Non cultivé	Cultivé
PERMEABILITE (mm/h)	322 à 556	127	365 à 791	24	2
	P ourcentage		par	Bassin	
CRATO	38 %	33 %	14 %	5 %	10 %
BATATEIRAS*	12 %	13 %	18 %	23 %	30 %

* Les 4 % manquants correspondent à la surface des villes (Crato et Juazeiro).

La formation géologique principale du bassin de Batateiras est composée de grès, qui engendrent cinq unités de sols. Il y a aussi des alluvions en provenance des sols situés plus haut.

TABLEAU A.2.3 Bassin Représentatif de BATATEIRAS
Résultats des tests d'infiltration. Méthode de Muntz

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES
BT 01	Latosol rouge jaune distrophe	556,8
BT 02	Latosol rouge jaune distrophe	322,6
BT 03	Podzoliques rouge jaune	127,6
BT 04	Podzoliques rouge jaune équivalent eutrophe	365,1
BT 05	Arènes distrophes	791,5
BT 06	Sols alluviaux eutrophes	1,9
BT 07	Association de sols podzoliques rouge jau : équivalent eutrophe sur alluvions	24,7

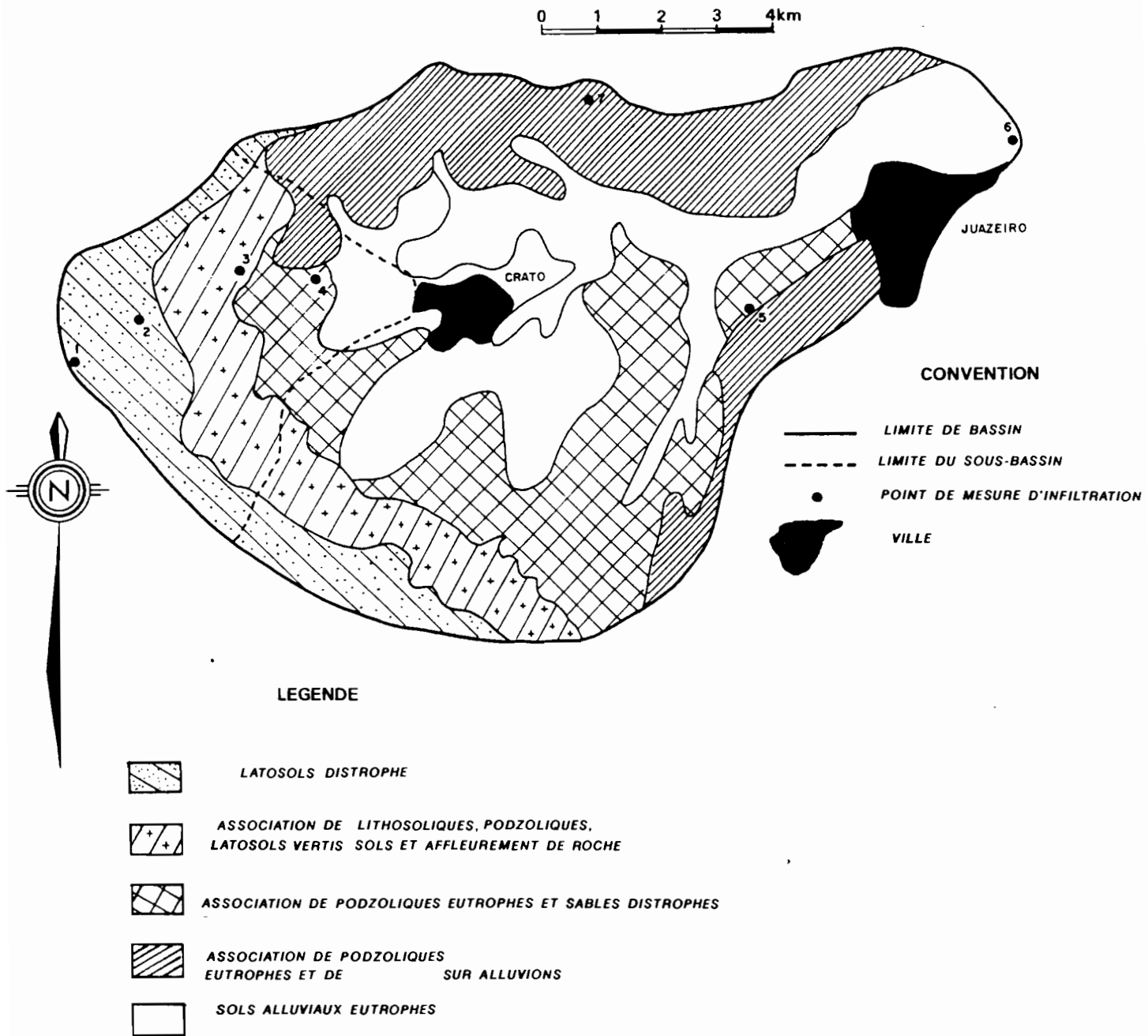


Figure A2.2 Cartes des sols du bassin de BATATEIRAS

TABLEAU TT A.2.4 - Bassin Représentatif de MISSÃO VELHA**Principales formations géologiques et type de sols**

Formation Géologique	G RES	PERMEABLES		ALLUVIONS	
Sols engendrés	Latosols rouge jaune dystrophes	Association complexe de sols litosoliques podzoliques rouge jaune latosols rouge jaune vertisols et massifs de roches	Association de Sols Podzoliques rouge jaune équivalent eutrophe et sables quartzeux	Association de Sols Podzoliques rouge jaune équivalent eutrophe et latosol rouge jaune	Sols alluvionnaires eutrophes
Relief	Très faible	Fort	Moderé à fort	Moderé à fort	Nul à faiblement ondulé
Occupation du sol	caatinga (capoeira)	Sols cultivés	- cultivés	Sols cultivés	Sols
Perméabilité (mm/h)	185	45 à 60	-	122	9
% du sol dans le bassin	22 %	17 %	12 %	39 %	10 %

La géologie est d'origine sédimentaire. Le grès perméable domine dans ce bassin, qui est recouvert de cinq unités de sol très proches de celles du Bassin de Batateiras.

TABLEAU A2.5 Bassin Représentatif de MISSÃO VELHA**Résultats des tests d'infiltration. Méthode de Muntz**

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES
MV 01	Latosol rouge jaune dystrophe	184,9
MV 02	Podzoliques rouge jaune équivalent eutrophe	58,8
MV 03	Podzoliques rouge jaune	45,5
MV 04	Podzoliques rouge jaune équivalent eutrophe	122,3
MV 05	Sols alluviaux eutrophes	9,1

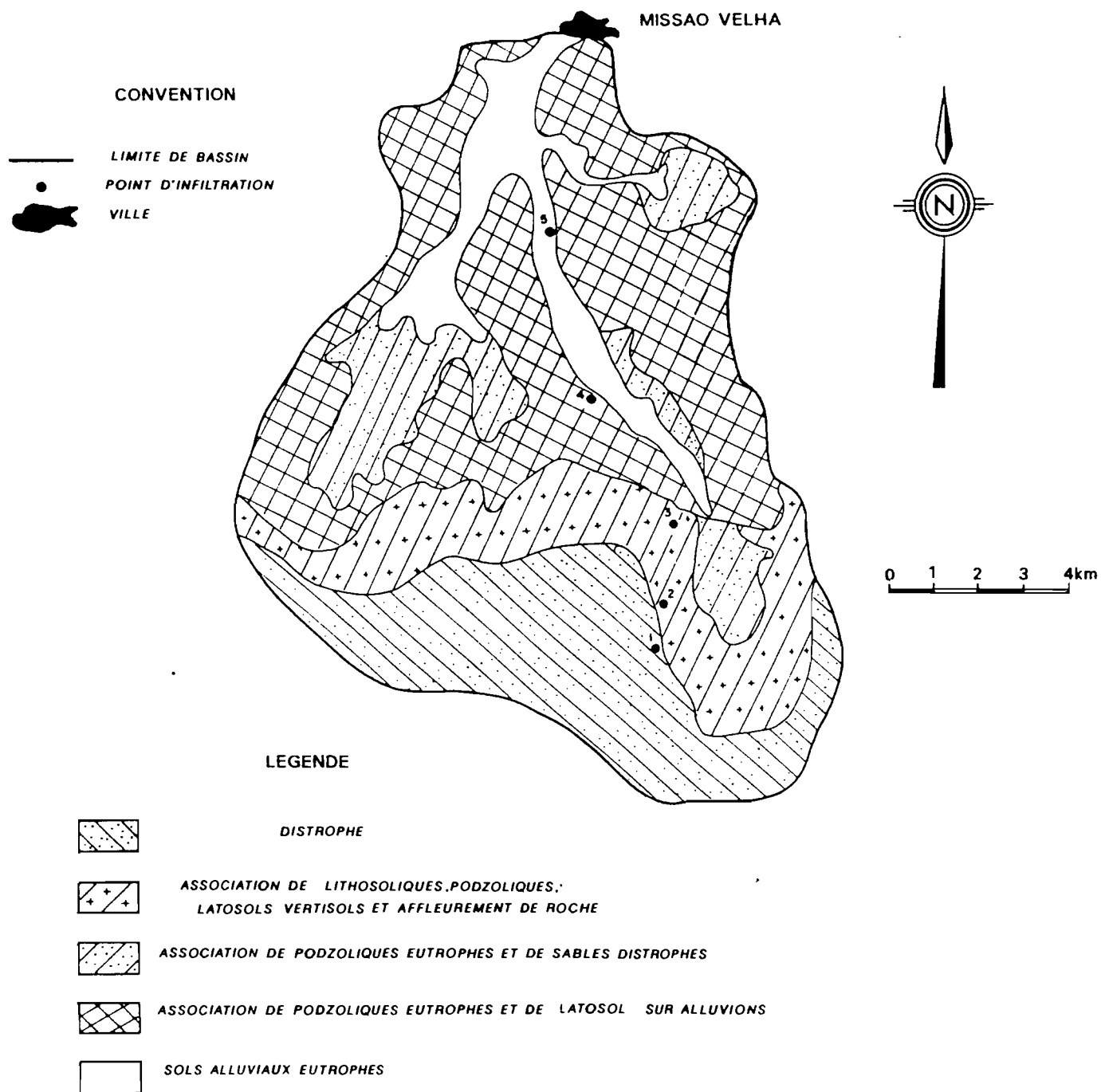


Figure A2.3 Cartes des sols du bassin de MISSÃO VELHA

TABLEAU A2.6 Bassin Représentatif de QUIXABINHA**Principales formations géologiques et type de sols**

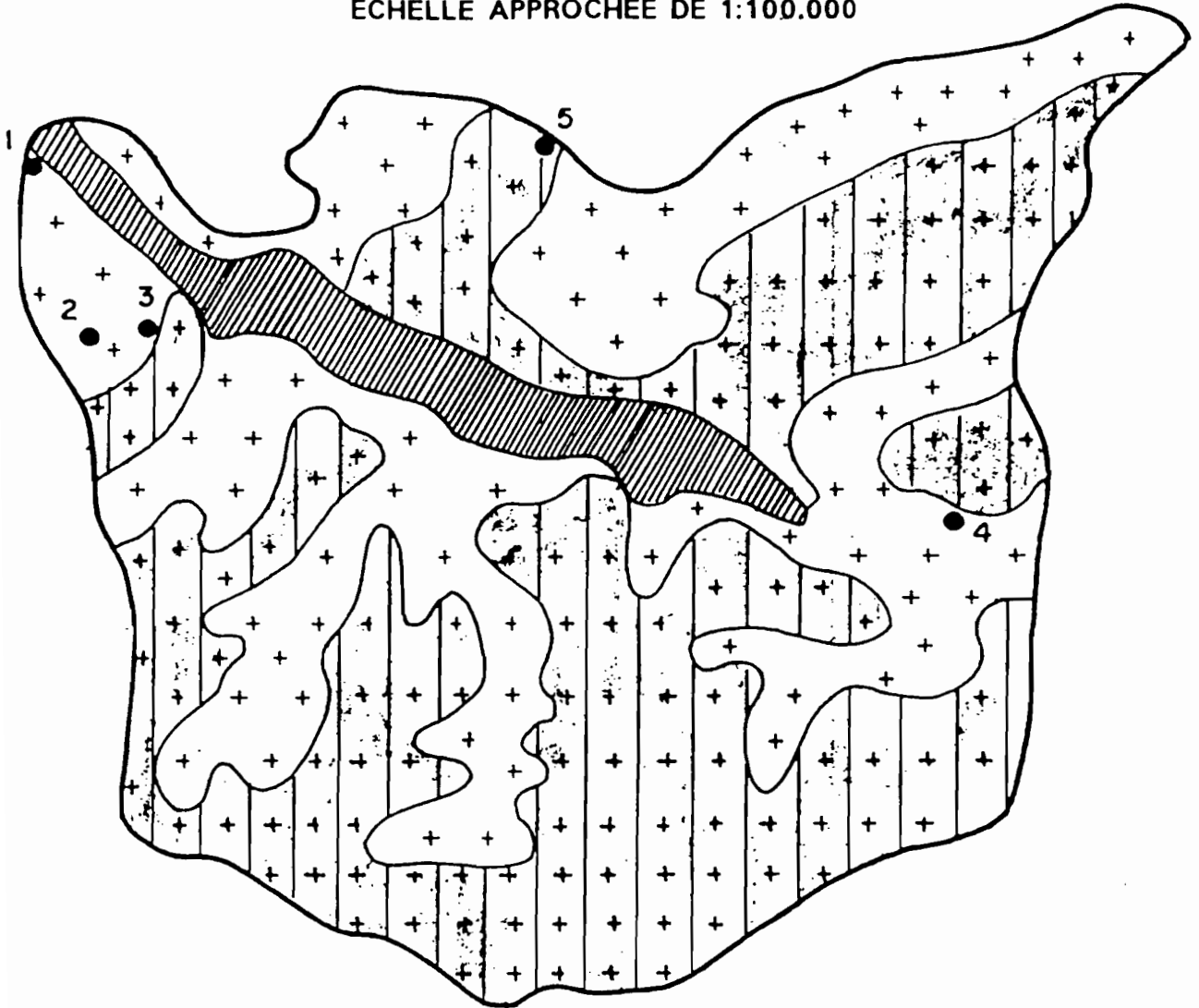
Formation Géologique	S C H I S T E S	G R E S
Sols engendrés	Sols lithosoliques eutrophes associés et sols bruns non calciques sur schistes	Sols lithosoliques distrophes associés à affleurements sur grès
Relief	Moderé à fort	Fort
Occupation du sol	Peu cultivé	Peu cultivé
Perméabilité (mm/h)	6 à 87	23 à 300
% du sol dans le bassin	40 %	54 %

Ce bassin est constitué de deux formations géologiques principales - les schistes - qui engendrent des sols lithosoliques eutrophes et des grès qui engendrent des sols lithosoliques distrophes.



TABLEAU A2.7 Bassin Représentatif de QUIXABINHA**Résultats des tests d'infiltration. Méthode de Muntz**

TEST	TYPE DE SOL	VALEUR MOYENNE APRES 6 HEURES
QX 01	Sol lithosolique eutrophe associé à brun non calcique sur schiste. Sol nu	33,0
QX 02	Sol lithosolique sur grès	197,0
QX 03	Sol lithosolique eutrophe associé à brun non calcique sur schiste	7,0
QX 04	Sol lithosolique en transition associé à brun non calcique	59,0
QX 05	Sol lithosolique d. associé à affleurements sur grès	34,0

ECHELLE APPROCHÉE DE 1:100.000



LEGENDE

-  SOLS LITHOSOLIQUES EUTROPHES ASSOCIES A DES SOLS BRUNS NON CALCIQUES SUR SCHISTES
-  SOLS LITHOSOLIQUES DISTROPHES ASSOCIES A DES AFFLEUREMENTS DE GRES

CONVENTION




-  LIMITE DE BASSIN
-  POINT D'INFILTRATION
-  AÇUDE

Figure A2.4 Cartes des sols du bassin de QUIXABINHA

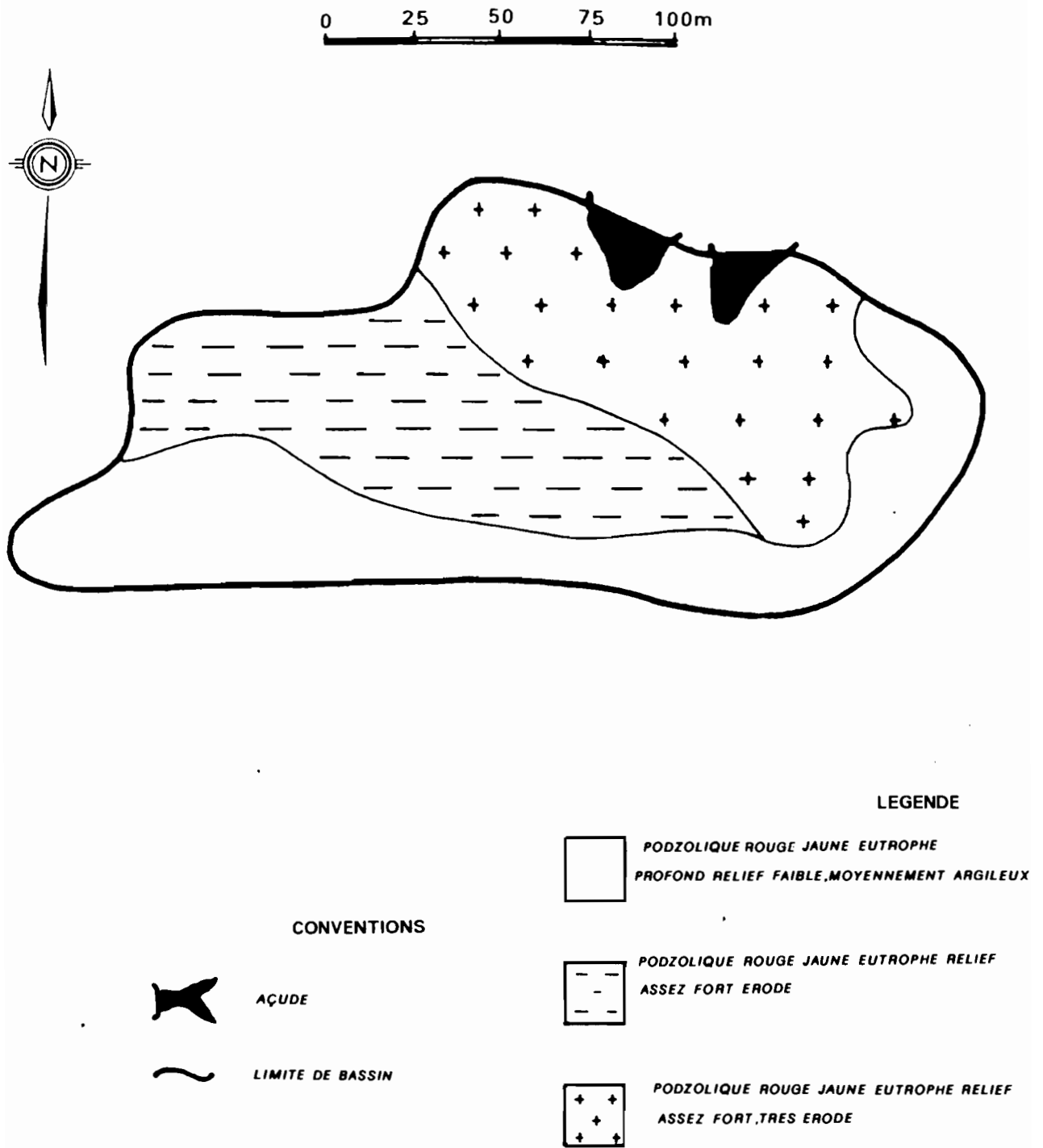


Figure A2.5 Carte des sols des bassins des projets pilotes : l'Açude Pedro Costa

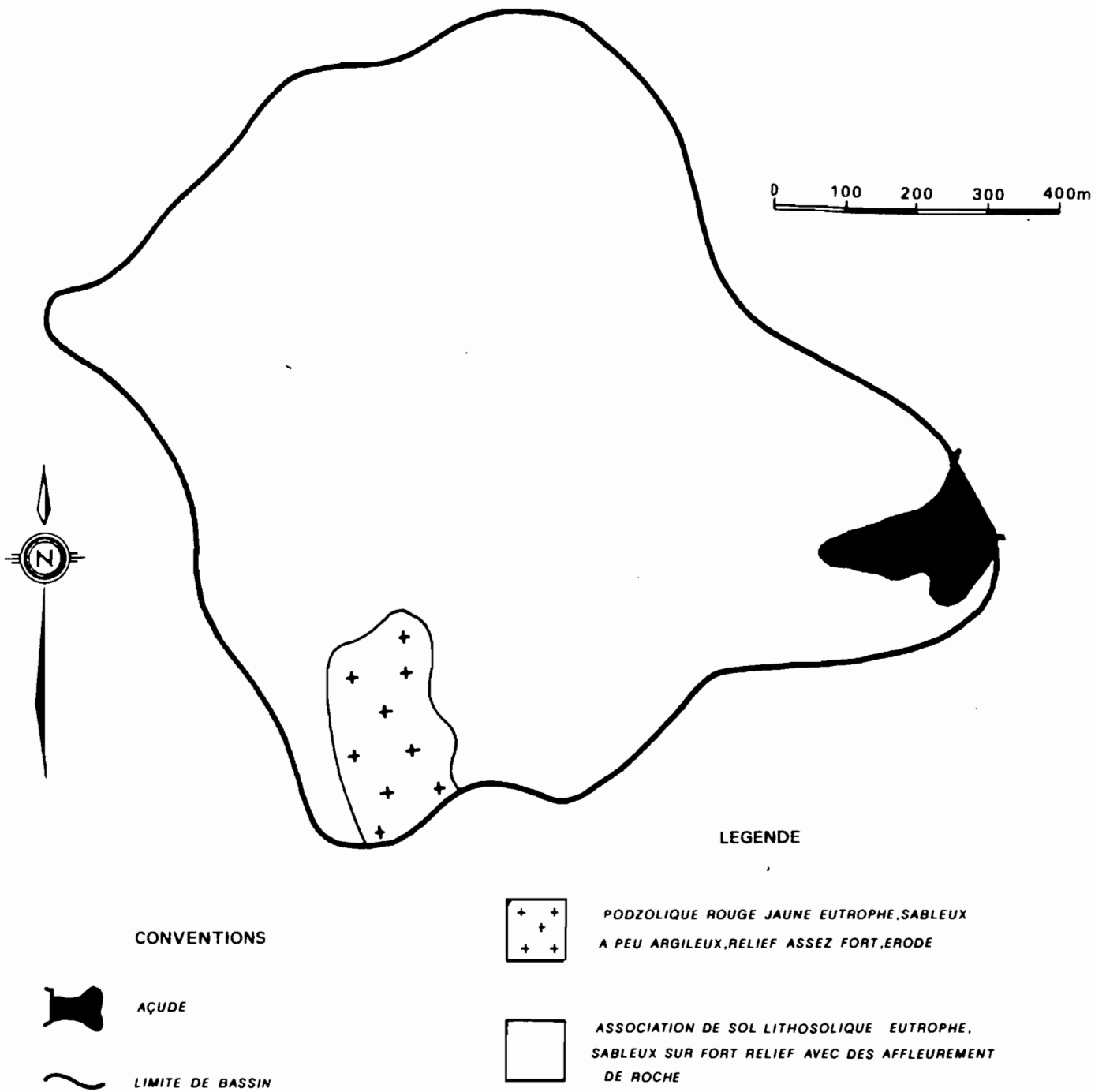


Figure A2.6 Carte des sols des bassins des projets pilotes : l'Açude Jericó

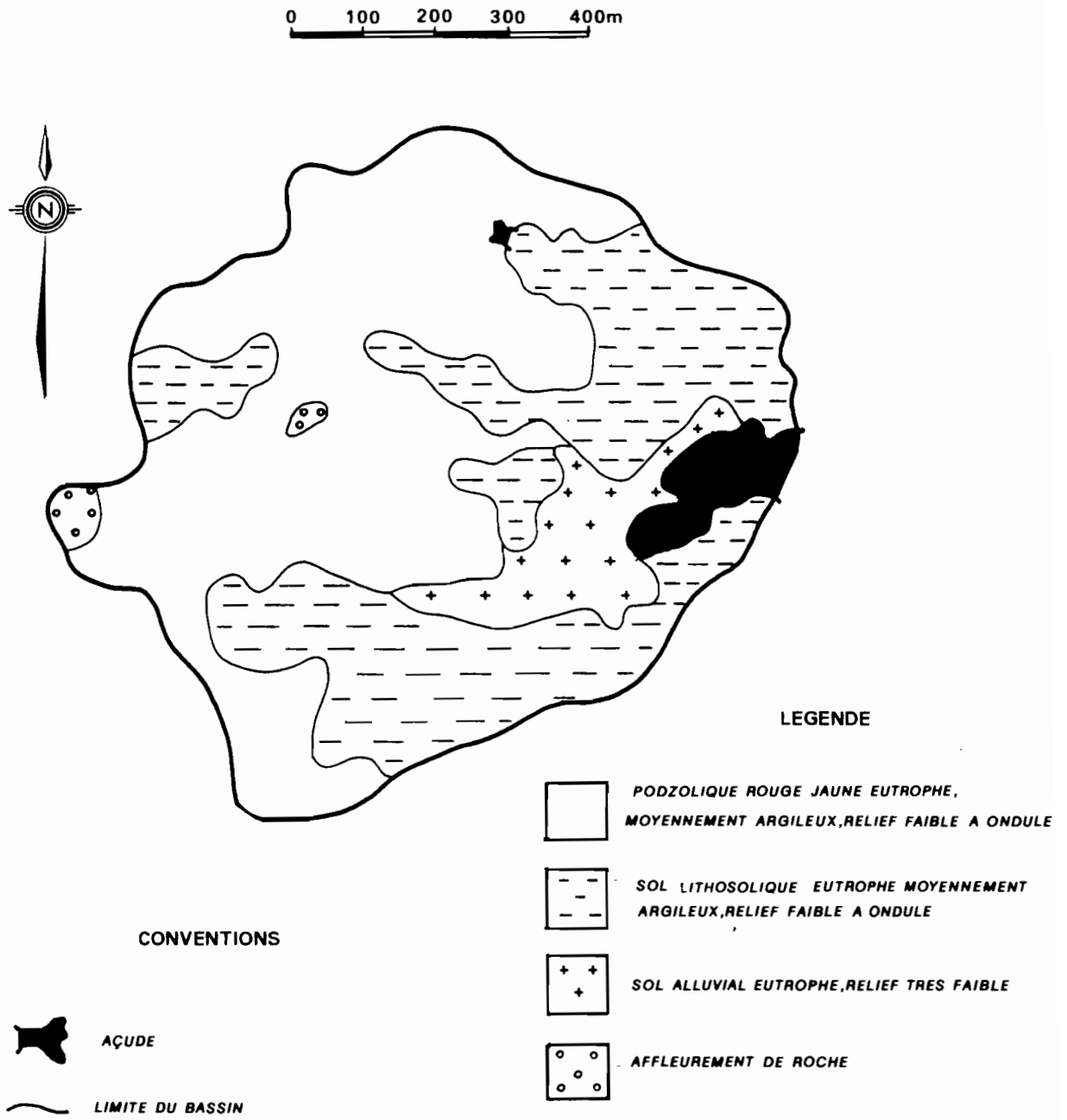


Figure A2.7 Carte des sols des bassins des projets pilotes : l'Açu de Manoel

RESULTATS OBTENUS

Chronique des lames observées

Les tableaux suivants présentent les lames précipitées ou écoulées des divers bassins.

Tableau A2.8 Lames précipitées et écoulées (en mm) sur le bassin de : BATATEIRAS PONT CARITE

1962	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Ju1	Août	Spt	Oct	Nov	Déc	Total
PLUIE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(5)	(210)	(75)	(290)
ECOUL.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0,2)	(13,0)	(7,0)	(20,2)
1963													
PLUIE	110	395	330	131	15	9	0	0	0	(15)	110	175	1280,0
ECOUL.	(8,6)	62,5	70,0	26,2	4,7	2,9	1,9	0,4	0,3	0,2	1,8	11,3	190,8
1964													
PLUIE	254	210	280	330	57	(40)	(4)	(20)	(0)	15	30	25	1265,0
ECOUL.	27,6	26,7	50,5	64,1	14,2	8,1	5,3	2,3	(0,7)	0	0	0,45	199,95
1965													
PLUIE	180	140	250	350	45	35	2	25	3	-	-	-	1030,0
ECOUL.	5,28	10,19	25,32	45,00	9,70	4,13	2,69	1,36	0	-	-	-	103,67

Tableau TT A.2.9 - Lames précipités et écoulées sur le bassin de : MISSÃO VELHA

1963	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Ju1	Août	Spt	Oct	Nov	Déc	Total
PLUIE	-	-	-	110	20	-	-	-	-	20	110	170	430
ECOUL.	-	-	-	2,0	0,8	-	-	-	-	-	-	-	2,8
1964													
PLUIE	245	220	240	300	50	45	15	10	-	-	-	-	1125
ECOUL.	1,1	3,7	8,1	16,5	1,5	0,4	-	-	-	-	-	-	31,3

Tableau A2.10 Lames précipitées et écoulées sur le bassin de : AÇUDE JARDIM

1965	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Ju1	Août	Spt	Oct	Nov	Déc	Total
PLUIE	176	98	162	276	11	103	(12)	-	-	-	-	-	838,0
ECOUL.	8,2	9,9	8,4	45,8	7,1	7,3	1,4	-	-	-	-	-	88,1

Tableau A2.11 Lames précipitées et écoulées sur le bassin de : QUIXABINHA

1965	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Ju1	Août	Spt	Oct	Nov	Déc	Total
PLUIE	130	63	189	200	25	33	(3)	-	-	-	-	-	643,0
ECOUL.	0,6	0,5	3,5	16,4	0,8	0	0	-	-	-	-	-	21,8

Tableau A2.12 Lames précipitées et écoulées sur les bassins des projets pilotes

Années	Açude Pedro Costa		Açude Jericó		Açude Manoel	
	Pluie	Ecoul.	Pluie.	Ecoul.	Pluie.	Ecoul.
1987	538,4	20,4	657,2	254,6	587,3	16,5
1988	799,6	38,4	551,9	158,4	871,5	70,0
1989	1287,4	62,0	1162,2	415,5	1312,6	78,9
1990	(510)	11,8	-	11,1	-	-

Caractéristiques des crues

Les caractéristiques de crues ne peuvent être mesurées que sur les bassins équipés de limnigraphe, ceci exclut les açudes des projets pilotes et l'açude JARDIM. Nous indiquons une partie des caractéristiques des hydrogrammes du bassin du rio BATATEIRAS à Crato, qui est un affluent du BATATEIRAS au PONT CARITE.

TABLEAU A2.13 Bassin du GVJ et des projets pilotes
Caractéristiques des crues

Bassin	Surface Km2	Hydrogramme unitaire		Débit maxi pour Ls = 1 mm	X10 (mm)	Kx moy	Q10 (m3/0)
		Temps de Montée	Temps de base				
Batat. Pont Carite	198	3h30'	40 h	3,33	13,0	2,68	35
Missão Velha	266	4h30'	15 h	11,5	4,0	14,29	57
Quixabinha	83	1 h	5 h	10,9	20,0	7,10	142
Granjeiro	18	1 h	2h45'	5,0	-	5,48	-
Batateiras Crato	29,5	0h30'	1h40'	12,0	-	6,75	-

■ Kx est la moyenne des débits maximums correspondants à une lame de 1 mm des hydrogrammes des dix plus fortes crues. Kx permet le calcul du débit décennal par la formule : $Q_{10} = K_x \cdot X_{10}$

Lames écoulées caractéristiques

Le tableau A2.14 fournit les lames écoulées caractéristiques de manière analogue à la présentation du chapitre 3. Nous constatons, dans ce tableau, que les valeurs de $L(p)$ et des lames de diverses fréquences sont généralement bien supérieures à L_{600} . Ceci est dû aux précipitations élevées que l'on constate sur ces bassins.

**TABLEAU A2.14 Bassins du GVJ et des projets pilotes
Lames écoulées caractéristiques (mm)**

E C O U L E M E N T S (mm)											
BASSIN	L_{600}	$L(p)$	DECEN. HUMIDE F=0,1	TRIEN. HUMIDE F=0,33	MEDIAN F=0,5	TRIEN. SEC F=0,67	DECEN. SEC F=0,9	$L(3AC)$	CRUE DECEN. X10	COEF. ECOULEMENT (%)	TOTAL DE LA PLUIE
BATATEIRAS	39	200	435	250	160	90	25	200	13	18.0	1100
MISSAO VELHA	14	42	81	51	36	24	9	51	4	4.4	950
ACUDE JARDIM	75	130	284	166	112	70	21	138	23	17.0	775
QUIXABINHA	41	72	166	88	53	26	4	49	20	9.0	775
MANOEL	30	64	160	81	53	26	4	62	18	8.0	830
JERICO	153	260	578	349	236	148	49	333	58	31.0	830
PEDRO COSTA	31	66	124	79	60	38	19	79	16	8.0	830

A N N E X E 3
LISTE ET QUALITE DES PLUVIOMETRES
SELECTIONNES

Zone Sigle et nom	Alt	Nbre d'années				Totaux annuels				Préc. 24 h		Qualité				
		M	H	J	S	M	H	J	S	1/2	1/10	A	B	C	D	QF
1 AFO AFOG. INGAZEIRA	525	64	71	70	65	579	594	592	610	59	96	9	9	5	9	2
1 AGB AGUA BRANCA	710	37	49	54	50	707	695	720	694	63	103	8	9	8	9	3
1 APO APODI	305	38	47	46	44	785	746	743	761	63	106	8	9	9	9	3
1 BET BETANIA	431	46	48	50	47	490	524	519	525	58	103	8	9	5	9	2
1 BSF B. S. FRANCISCO	305	70	50	73	48	440	472	443	477	66	125	8	5	5	5	1
1 CAB CABROBO	350	36	38	0	36	450	460	0	466	54	113	9	5	5	9	1
1 CEC CERRO CORA	590	45	50	51	53	560	585	580	585	74	155	9	4	4	5	0
1 CED CEDRO AC	190	72	78	75	76	810	829	824	827	60	94	9	9	9	9	4
1 CRU CRUZETA	140	55	49	65	57	493	549	579	556	56	91	4	5	8	9	0
1 CUN CURRAIS NOVOS	350	64	67	74	69	420	425	444	428	54	90	9	5	8	9	2
1 CUR CURACA	341	64	63	64	63	468	454	453	454	58	100	9	9	5	9	2
1 DMA DOM MAURICIO	300	62	71	65	68	980	1013	1017	1017	68	109	9	5	5	8	1
1 EMA EMA	210	51	56	53	54	838	817	827	818	67	104	9	9	5	8	2
1 FEI FEITICEIRO	180	46	51	49	50	704	721	708	714	63	105	9	9	9	9	4
1 FLO FLORANIA	210	67	45	73	47	643	600	657	598	56	89	8	8	8	9	3
1 FLS FLORES	460	64	59	66	51	740	748	755	780	68	106	9	5	9	9	2
1 HIP HIPOLITO	230	47	44	50	45	537	550	550	535	56	100	9	5	5	9	1
1 IBI IBICUA	273	52	66	70	63	779	761	784	758	68	114	8	8	9	9	3
1 ICO ICO	160	66	61	66	54	737	731	745	737	65	112	9	9	9	9	4
1 IGU IGUATU	213	61	66	68	63	785	806	801	793	69	109	9	8	5	9	2
1 IMA IMACULADA	750	43	52	52	55	634	646	658	652	59	99	9	9	8	9	3
1 JAG JAGUARIBE	120	60	63	65	61	684	674	681	667	62	104	9	9	9	9	4
1 JAR JARDIM	630	71	78	74	77	780	792	788	793	64	102	9	9	8	8	3
1 JAS JARDIM SERIDO	220	70	57	72	54	540	569	566	555	57	108	8	8	8	9	3
1 JUT JUTAI	361	41	46	46	41	562	592	583	604	62	112	8	9	5	9	2
1 LIN LIMOEIRO NORTE	35	65	64	66	60	730	740	712	734	59	93	9	8	9	9	3
1 MED MENDUBIM	170	47	51	50	50	699	665	679	665	57	107	8	8	9	9	3
1 MIL MILHA	180	49	52	58	48	746	793	760	806	69	113	8	8	9	8	3
1 MRJ MARACAJA	210	48	52	51	49	704	730	718	734	68	117	9	5	5	9	1
1 OLA OLHO D'AGUA	150	49	53	54	51	849	821	804	828	65	101	9	9	5	9	2
1 PAL PALHANO	20	48	50	53	36	740	775	732	812	59	95	9	9	5	8	2
1 PAR PARNAMIRIM	379	66	69	70	64	544	553	580	572	62	122	9	8	9	9	3
1 PAU PARAU	38	56	60	63	60	690	598	633	610	57	91	4	5	5	9	0
1 PEB PEDRA BRANCA	480	63	65	64	55	840	870	864	870	64	106	9	9	9	9	4
1 PES PESQUEIRA	650	52	38	62	36	670	696	679	711	61	106	8	9	9	9	2
1 PET PETROLINA	376	63	69	69	63	427	439	430	434	56	109	9	8	9	9	3
1 POT POTENGI	480	44	43	47	35	780	685	679	702	56	102	4	5	5	9	0
1 PRM PRUDENTE MORAIS	180	56	65	58	58	671	715	697	684	60	94	8	8	9	9	3
1 QUX QUIXERAMOBIM	187	61	71	73	67	706	783	783	785	60	110	5	9	5	9	1
1 RAO RIACHAO	60	61	61	61	57	1069	1082	1070	1097	68	114	9	5	5	5	1
1 RRE RIO REAL	220	66	66	69	69	924	928	928	928	49	86	9	5	8	9	2
1 SAL SALGUEIRO	415	70	69	73	70	585	579	589	595	61	106	9	9	9	9	4
1 SAR STO ANT. RUSSAS	40	71	78	73	75	746	768	766	768	56	90	9	8	9	9	3
1 SED SERRA DO DOUTOR	520	33	36	42	37	624	684	711	707	64	111	5	9	5	9	1
1 SEN SENTO SE	380	40	43	43	42	485	476	476	478	60	118	9	8	9	9	3
1 SER SERRITA	425	45	48	51	50	604	594	587	586	60	104	9	9	5	9	2
1 SET SERRA TALHADA	435	58	58	73	65	598	592	649	637	59	97	9	9	9	9	4
1 SJC S. JOAO CARIRI	445	52	71	71	66	395	392	381	390	58	117	8	5	5	5	1
1 SJE S. JOSE EGITO	575	50	67	71	72	550	506	543	497	60	105	5	9	5	8	1
1 STC SANTA CRUZ	489	46	43	48	45	540	552	617	562	55	85	9	5	5	9	1
1 STM SITIO MOREIRAS	750	43	43	45	43	694	648	640	648	58	102	8	9	9	9	3
1 STZ SANTA LUZIA	290	69	72	72	71	560	542	548	554	58	92	9	8	8	9	3
1 SUM SUME	510	38	41	49	41	616	550	585	548	62	113	4	9	4	5	0
1 SVI S. VICENTE	320	49	50	52	50	560	569	568	575	59	101	9	9	8	9	3
1 TAT TATAIRA	100	43	49	48	45	791	795	782	805	66	111	9	9	9	9	4
1 VAZ VAZANTES	50	50	55	54	55	855	912	901	912	61	101	8	9	5	9	2
2 ARN ARNEIROZ	325	63	45	63	39	558	589	578	602	55	86	8	9	9	8	3
2 ARU ARACATIACU	190	63	49	63	48	638	669	645	654	56	89	8	9	8	9	3
2 MAR MARRUAS	490	44	46	48	38	666	641	634	629	51	92	9	9	8	9	3

Zone	Sigle et nom	Alt	Nbre d'années				Total M	annuels		Préc. 24 h		Qualité				
			M	H	J	S		J	S	1/2	1/10	A	B	C	D	QF
2	SBL SOBRAL AC	110	59	59	59	55	845	838	844	56	88	9	9	9	9	4
2	STA STA ANTONIO	255	43	36	44	33	673	646	658	53	86	9	9	8	9	3
3	CAE CAIRE	157	68	71	72	67	894	898	924	64	102	9	9	9	9	4
3	CRS CRATEUS	275	67	71	74	68	690	728	718	732	64	106	8	9	9	3
3	IPU IPUEIRAS	238	69	66	71	63	881	990	926	978	66	101	4	9	9	0
3	SIM SIMPLICIO MENDES	319	59	58	60	48	713	716	726	743	63	99	9	9	5	8
3	STQ SANTA QUITERIA	190	69	73	71	71	780	797	799	804	62	100	9	9	9	4
4	BRR BARRA	410	60	71	69	69	775	750	760	760	68	107	8	9	8	2
4	COC COCOS	549	36	42	39	42	970	948	949	948	73	123	9	8	8	3
4	COT COTEGIPE	484	44	47	47	45	1050	1081	1069	1078	84	131	9	4	9	0
4	MAN MANSIDAO	536	38	44	41	42	876	889	898	898	64	99	9	8	9	3
4	MAQ MARIQUITA	750	43	47	45	46	890	902	898	910	60	97	9	5	8	2
4	MOR MORPARA	415	42	44	46	41	770	763	760	775	70	118	9	9	9	3
4	PIL PILAO ARCADE	358	62	66	66	60	657	645	653	661	60	97	9	5	8	3
4	REM REMANSO	378	65	70	69	65	567	581	578	588	62	104	8	8	8	2
4	SAN SANTANA	580	42	47	45	44	1030	973	986	979	73	113	8	9	9	3
4	SMV STA M. VITORIA	430	44	45	44	44	1060	1053	1078	1055	77	122	9	5	8	2
4	SRN S. R. NONATO	386	58	42	60	39	706	705	694	692	68	113	8	9	9	3
4	XIQ XIQUE XIQUE	403	57	55	57	57	652	616	626	622	62	104	8	8	5	1
5	BJL BOM JESUS LAPA	435	61	60	68	66	770	824	833	828	67	118	8	8	1	2
5	BOM BOM SOSSEGO	490	39	16	39	13	670	744	667	788	56	88	5	5	5	1
5	BRM BARRA DO MENDES	706	44	48	47	47	567	576	576	572	64	108	9	9	9	4
5	BRU BRUMADO	457	64	59	64	58	630	641	641	640	63	100	9	9	5	2
5	CAR CARIRANHA	452	58	67	64	63	780	791	813	808	64	104	9	9	9	3
5	CAT CAETITE	826	64	58	64	61	810	825	841	849	63	103	9	9	5	2
5	CON CONDEUBA	695	67	71	74	68	740	734	751	750	65	104	9	9	9	4
5	IRE IRECE	722	35	35	39	39	585	588	582	582	58	97	9	8	9	3
5	JEQ JEQUIE	199	63	62	63	57	615	671	688	670	63	120	5	8	5	1
5	MAC MACAUBAS	656	56	63	62	61	829	799	802	801	61	89	9	8	9	3
5	NOA NOVO ACRE	590	54	58	57	55	870	850	876	861	68	119	8	8	9	3
5	PIN PINDAI	590	48	48	50	40	600	579	589	584	58	102	9	8	5	2
5	PRN PARAMIRIM	593	67	62	70	60	705	701	716	710	57	91	9	5	5	1
5	RIO RIO DE CONTAS	1002	69	74	72	72	845	853	859	860	61	103	9	9	5	2
5	RIS RIACHO SANTANA	627	46	48	50	49	840	846	852	851	62	98	9	9	9	4
5	STI S. TIMOTEO	700	42	44	43	43	690	683	683	683	60	98	9	9	9	4
6	AGU AGUIAR	280	39	49	50	49	875	854	894	849	75	141	9	8	5	2
6	ARR ARROJADO	240	55	50	58	46	803	844	825	857	77	130	9	9	5	2
6	AUR AURORA	65	69	56	70	52	834	909	871	923	65	96	5	5	9	1
6	BJE BOM JESUS	470	38	45	50	40	805	916	863	932	80	140	4	5	5	0
6	BSA BREJO SANTO	490	67	71	68	64	904	922	901	894	70	110	9	9	9	4
6	CAI CAICO	143	69	58	75	58	671	701	683	693	64	108	8	5	8	1
6	CAZ CAJAZEIRAS	291	71	67	73	65	865	895	881	897	72	113	9	9	9	4
6	CUE CUREMAS	220	44	47	50	43	830	869	882	858	74	123	9	9	5	2
6	LAM LAV. MANGABEIRA	247	65	59	65	51	870	857	856	839	69	118	9	9	5	2
6	MAT MARTINS	645	69	71	73	70	1097	1100	1192	1091	82	145	9	5	5	1
6	MAV MARCELINO VIEIRA	195	46	49	52	47	753	794	797	781	69	116	8	9	5	2
6	MIE MILAGRES	371	67	66	71	58	927	926	940	945	76	125	9	9	5	1
6	MIV MISSAO VELHA	352	64	70	70	64	915	968	954	972	76	118	8	9	9	3
6	PAT PATOS	270	47	52	48	47	824	814	829	800	71	118	9	9	5	2
6	POM POMBAL	178	65	71	75	71	805	699	731	728	65	101	4	5	5	0
6	POR PORCOS	270	36	44	44	39	804	770	767	784	70	114	9	9	5	2
6	POS PATOS	250	54	47	72	68	744	753	715	805	75	138	9	8	9	3
6	PRI PRINCESA ISABEL	660	70	74	75	77	830	817	789	826	68	112	9	9	9	4
6	PRT PORTEIRAS	520	70	66	75	60	884	890	885	903	76	122	9	9	9	4
6	SAC SANTANA CARIRI	480	64	66	67	65	918	945	934	946	73	114	9	9	8	3
6	SEG SERRA GRANDE	585	47	47	48	42	866	788	892	779	74	130	5	9	5	1
6	SGO S. GONCALO	235	41	44	45	42	891	900	914	911	75	127	9	9	5	2
6	SJP S. JOSE PIRANHAS	300	43	47	48	50	914	987	979	989	70	108	8	8	5	1
6	SNN SER. NEGRA NORTE	160	57	69	71	68	777	726	735	726	73	128	5	9	9	1
6	SOU SOUZA	200	56	63	75	61	774	767	784	768	70	114	9	9	5	2
6	TEI TEIXEIRA	770	35	59	73	72	693	688	715	715	70	121	8	9	5	2
6	UMA UMARI	350	71	75	73	75	770	785	783	785	63	97	9	5	9	2
6	VAA VARZEA ALEGRE	345	65	69	73	70	980	962	980	971	71	106	9	8	5	2
6	VAR VARZEA	220	56	55	58	55	845	922	889	908	79	139	5	8	9	1
7	JOA JOAO AMARO	249	62	60	62	59	635	634	635	639	58	90	9	5	9	2
7	MAB MTE ALEGRE BA	424	44	52	49	48	822	783	796	788	63	115	9	5	8	2
7	MRC MORRO CHAPEU	1012	62	66	67	64	746	742	741	746	60	101	9	5	9	2
7	PIU PINDOBAU	600	47	50	50	50	967	953	953	953	60	116	9	8	5	2
7	SRB SENHOR BOMFIM	544	69	72	74	69	836	847	843	843	61	101	9	5	9	2

Zone Sigle et nom	Alt	Nbre d'années				Totaux annuels				Préc. 24 h		Qualité				
		M	H	J	S	M	H	J	S	1/2	1/10	A	B	C	D	QF
8 ALG ALAGOA GRANDE	180	43	31	47	47	942	942	950	949	63	108	8	9	5	9	2
8 ARA ARARUNA	580	69	69	75	70	859	854	845	869	61	123	9	8	5	5	1
8 CAA CASTRO ALVES	265	55	61	57	55	949	847	865	878	51	95	4	8	4	9	0
8 FRP FREI PAULO	272	67	70	71	66	816	808	819	815	54	96	9	5	9	9	2
8 FST FEIRA DE SANTANA	257	45	49	48	47	865	863	868	858	55	106	9	9	9	9	4
8 IPI IPIRA	299	55	59	56	56	750	740	754	749	55	101	9	9	9	5	2
8 IRA IRARA	283	60	63	63	60	1030	1033	1040	1037	62	116	9	5	5	5	1
8 ITA ITABAIANA	45	64	66	73	72	745	740	771	769	55	100	9	5	9	9	2
8 LAC LAGOA DA CANOA	235	48	54	52	52	929	1001	1002	1007	53	89	8	8	5	9	2
8 MSD N.SENHORA.DORES	200	66	69	70	72	990	1055	1049	1063	61	102	9	9	9	9	4
8 PRC PORTO R. COLEGIO	30	67	70	67	68	905	910	909	912	56	112	9	9	9	8	3
8 PRP PROPRIA	17	46	48	0	47	827	780	0	796	51	95	8	8	5	9	2
8 SAP SAPE	125	54	59	61	60	1020	1018	1029	1036	68	117	9	8	5	9	2
8 SRA SERRINHA	377	65	65	67	60	875	848	851	856	58	101	9	9	5	9	2
8 STT SANTA TEREZINHA	198	38	40	41	39	541	568	577	574	51	86	9	5	9	9	2
8 TIM TIMBAUBA	190	70	75	75	74	1025	1079	1048	1054	61	104	8	9	5	9	2
8 TOB TOBIAS BARRETO	157	66	64	64	61	751	760	764	765	54	96	9	9	9	9	4
9 BMD BREJO MAD.DEUS	646	61	58	64	59	878	842	850	852	63	110	9	5	8	9	2
9 CAG CAMPINA GRANDE	508	63	52	74	59	725	751	764	770	48	90	8	9	5	8	2
9 CAU CARAUBAS	460	34	52	54	54	360	367	366	375	49	93	8	9	5	9	2
9 CID CICERO DANTAS	420	64	72	72	71	924	880	889	880	58	112	9	5	9	9	2
9 GAR GARANHUNS	866	51	37	58	40	787	749	782	758	48	90	8	9	9	9	3
9 MAI MAJOR ISIDORO	217	69	69	72	70	665	668	668	674	48	83	9	8	9	9	3
9 PAN PANELAS	620	47	49	49	46	628	602	618	611	48	94	9	9	9	5	2
9 POF PORTO DA FOLHA	45	67	63	70	61	536	552	542	553	44	78	9	5	9	9	2
9 QUE QUEIMADAS	273	66	70	66	64	537	539	538	529	51	105	9	8	5	9	2
9 SBU S.BENTO DO UNA	645	61	63	62	62	590	600	600	589	55	97	9	8	8	9	3
9 SUR SURUBIM	380	57	65	72	63	630	644	645	650	46	84	9	9	9	9	4

Sigles utilisés:

Alt = Altitude du pluviomètre

Prec. 24h = Précipitation en 24 heures de période de retour biennale et décennale.

Autres sigles: Rappelons les explication données au paragraphe 4.3.2.2

*** Définition des quatres critères de qualité A,B,C,D.**

Les 156 pluviomètres de la liste du tableau ci-dessus ont fait l'objet d'une sélection sévère et sont donc tous supposés être de bonne qualité. Cependant, nous cherchons, rappelons-le, à sélectionner un très petit nombre de pluviomètres de la meilleure qualité possible, dont on connaisse la représentativité géographique pour qu'il puissent servir "d'entrée" à des modèles. Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué un nouveau tri de ces 156 postes, tri basé sur les principes suivants :

a) **Cohérence entre les totaux annuels homogénéisés par MOLINIER et les fichiers de pluies journalières (critère de qualité A).**

Les données de chaque pluviomètre apparaissent dans quatre fichiers différents :

M = Annuaire pluviométrique mensuel publié par la SUDENE en 1990 issu du fichier de pluviométrie mensuelle PLM.

H = Moyenne homogénéisée au niveau annuel par MOLINIER.

J = Données journalières calculées à partir du fichier de pluviométrie journalière PLV de la SUDENE.

S = Données journalières du fichier que nous utiliserons comme "entrée" pour les modèles.

C'est à ce fichier "S" que nous devons, en définitive, garantir la meilleure qualité possible.

Dans le tableau ci-dessus, nous avons reporté les moyennes pluviométriques et le nombre d'années prises en compte par ces quatre fichiers. Les petites différences que nous constatons entre ces diverses valeurs sont normales, puisque les périodes et les modes de traitement des lacunes ne sont pas toujours les mêmes pour chacun de ces fichiers. Par contre, les différences qui dépassent un certain seuil reflètent des incohérences :

- H très différent de M signifie qu'une importante correction a été apportée par MOLINIER au niveau des totaux annuels, correction que nous ne savons pas appliquer au niveau journalier.
- Des données journalières J ou S très différentes des données annuelles M ou H, signifient souvent qu'une partie des données annuelles ne sont pas disponibles au niveau journalier.

b) et c) Cohérence du pluviomètre avec la zone qui l'entoure (critère de qualité B et C).

Deux critères de qualité permettent de comparer le "comportement" du pluviomètre par rapport aux autres pluviomètres de sa zone climatique :

- Le critère B rend compte de la cohérence des totaux en 24 h de faible fréquence, par rapport au reste de la zone.
- Le critère C rend compte de divers autres aspects du régime pluviométrique, irrégularité de la distribution des totaux annuels, séquences d'années déficitaires consécutives et part des crues dans les écoulements que ces séries pluviométriques engendreraient (selon une technique décrite plus loin, au paragraphe 4.3.3.1.).

Une incohérence ou une différence significative entre un pluviomètre et sa région peut refléter des conditions orographiques particulières (micro-climat) ou une mauvaise qualité des données.

d) Qualité de la distribution des totaux en 24 heures (critère de qualité D).

Une analyse des totaux en 24 heures permet de cerner les périodes et les pluviomètres douteux en utilisant des techniques classiques : examen du nombre de jours de pluie, du nombre de fois qu'un total se termine par 0 ou est un multiple de 7 ou de 25 mm⁴, du nombre de jours de pluies inférieurs à 10 mm, examen critique des plus fortes pluies, etc...

*** Détermination de la classe de qualité globale QF**

Quatre classes de qualité ont été établies pour chacun des critères, A, B, C, D selon les conventions suivantes :

- 9 : aucune restriction,
- 8 : acceptable,
- 5 : médiocre,
- 4 : mauvaise, en principe éliminatoire,
- 0 : signifie que le critère n'a pas été évalué.

Les pluviomètres ont ensuite été classés en cinq classes de **qualité globale** numérotées de 0 à 4, la dernière valeur (4) correspondant aux données de meilleure qualité. Cette classe de qualité globale intègre les quatre critères définis précédemment.

Répartition des pluviomètres par classe de qualité globale

Qualité globale		Condition	Nombre de pluviomètres
EXCELLENTE	4	Quatre "9"	23
TRES BONNE	3	uniquement des "8" ou des "9"	39
BONNE	2	["8" ou "9" pour le Code A] et [(1 x "5" et 2 x ("8" ou "9"))]	58
MOYENNE	1	pas de code "4"	26
DOUTEUSE	0	un ou plusieurs "4"	10

A N N E X E 4
FONCTIONNEMENT DU MODELE
SUDENE/ORSTOM AVEC DES PLUVIOMETRIES
AFRICAINES

Utilisation du modèle SUDENE/ORSTOM calé sur la station de Caldeirão avec 17 pluviomètres du Sahel Africain.

Nous avons utilisé le modèle SUDENE/ORSTOM avec 17 pluviomètres situés en Afrique Occidentale, entre l'isohyète 400 et 1000 mm.

L'ajustement de $\text{Log}(P) = f(P)$ conduit à des valeurs de L_{600} pour les pluviomètres très proches de ceux de la zone Sertão. (77,5 mm pour l'Afrique, au lieu de 82,5 pour le Sertão)

Les coefficients A ajustés sur les résultats africains sont un peu inférieurs à ceux de la zone Sertão (A = 0,0022 au lieu de 0,0028 pour le bassin de Caldeirão).

Il est intéressant de constater que les différences entre les pluviomètres africains et ceux du Sertão, bien que situés à des milliers de km de distance, sont bien inférieures à celles que l'on constate entre la Grande zone climatique Sertão et la Grande zone climatique de Transition.

Tableau A4.1 Résultats de l'utilisation du modèle SUDENE/ORSTOM avec 17 pluviomètres du réseau synoptique de l'Afrique semi-aride.

SIGLE	PLUIE	ESCOM	LA01	LA033	LA05	LA067	LA09	L3AC	X1	X10
FA1	852.43	130.27	243.68	141.70	120.34	87.91	43.52	144.67	29.51	18.85
FA2	1125.64	239.23	411.33	301.12	221.98	177.71	83.43	390.79	49.70	27.47
FA3	963.70	168.96	267.91	186.40	147.46	119.84	59.97	212.18	50.45	21.63
FA4	917.78	177.46	269.01	201.56	175.42	149.94	72.94	186.89	44.73	21.95
FA5	529.51	54.41	102.63	60.21	48.09	32.69	18.33	73.02	21.15	10.96
FA6	875.29	145.81	264.54	153.02	133.37	99.55	66.96	219.86	38.91	19.36
FA7	1187.19	224.68	405.56	225.44	159.07	136.80	76.20	276.67	54.82	27.84
FA8	678.96	91.22	173.25	93.77	73.67	57.67	29.64	103.25	36.08	15.76
FA9	949.35	161.93	275.10	179.79	148.26	129.50	70.37	182.17	39.06	20.39
MA1	727.95	120.11	224.10	141.78	98.35	75.58	38.17	151.22	38.51	18.86
MA2	532.69	53.38	112.71	68.55	32.73	22.28	12.15	32.44	23.50	11.43
MA3	621.40	111.15	234.77	112.63	68.49	40.44	11.22	44.68	58.77	22.68
MA4	745.65	110.21	197.21	125.97	107.31	80.55	40.55	135.40	32.30	15.94
NI1	586.44	72.07	152.32	72.80	56.23	47.66	24.04	88.31	28.76	12.86
NI2	480.16	50.67	112.73	53.77	40.97	26.72	12.17	35.65	23.74	11.77
NI3	484.22	63.75	144.33	66.77	48.07	31.74	13.29	60.43	30.87	14.10
TC1	613.97	89.65	194.99	100.30	67.84	42.73	21.00	94.78	33.72	16.38

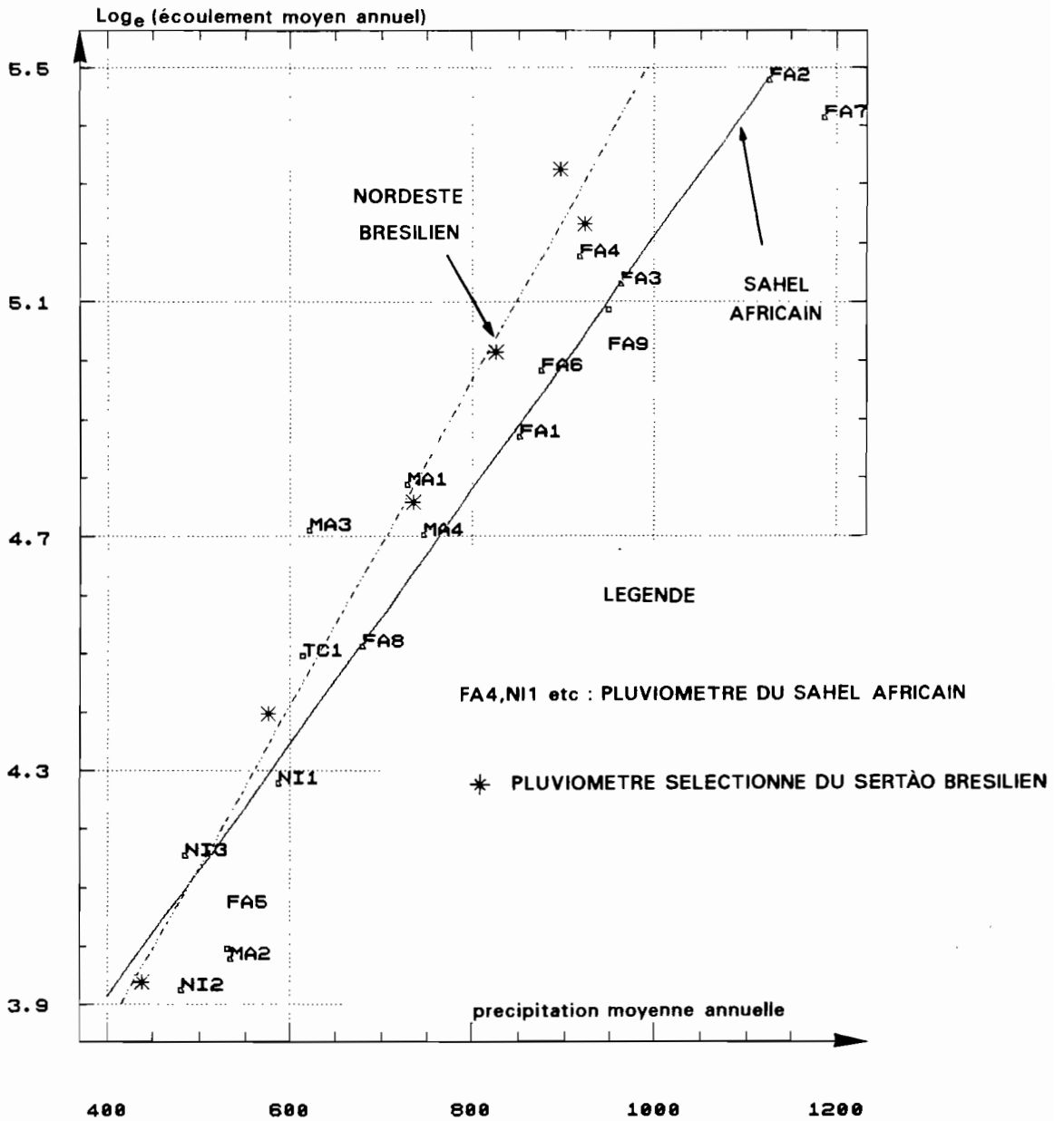


Figure A4.1 Comparaison des réponses du modèle SUDENE/ORSTOM utilisé avec des pluviomètre Africains et Brésiliens

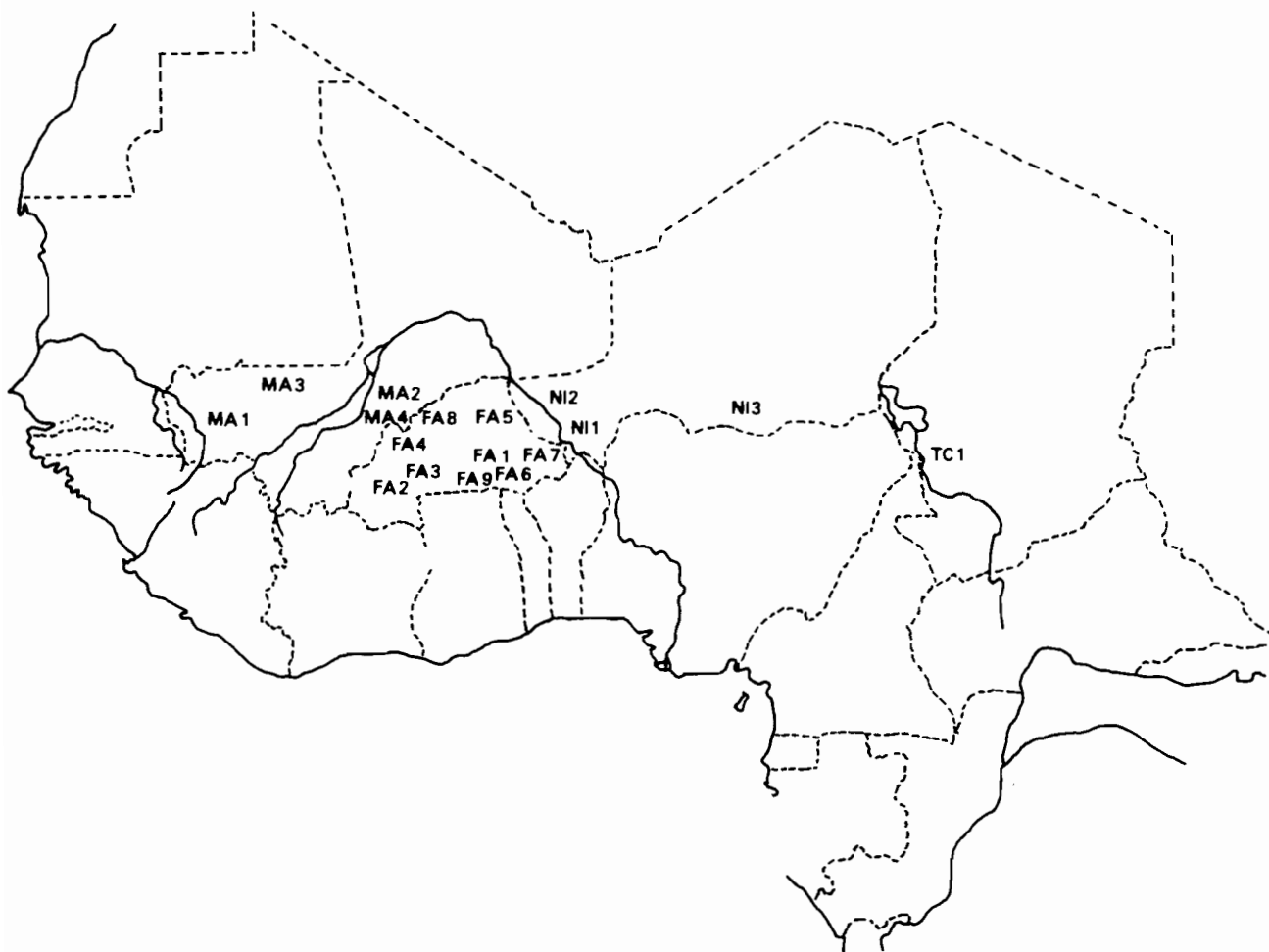


Figure A4.2 Carte de situation des pluviomètre Africains utilisés

Tableau A4.2 Liste des pluviomètres africains utilisés.

SIGLE	NOM du pluviomètre
FA1	OUAGOUDOUGOU AERO
FA2	BOBODIOLASSO
FA3	BOROMO
FA4	DEDOUGOU
FA5	DORI
FA6	FADA NGOURMA
FA7	GAUA
FA8	OUAHIGOUYA
FA9	PO
MA1	KAYES
MA2	MOPTI
MA3	NIORO DU SAHEL
MA4	SAN
NI1	NIAMEY AERO
NI2	TILLABELY
NI3	ZINDER
TC1	N'DJAMENA AERO

ANNEXE 5

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE : Abréviations et sigles utilisés:

ACP Analyse en Composantes Principales
ASMIC Association pour l'Organisation des Missions de Coopération technique
ATP Action Thématique Programmée
BUREC Bureau of Reclamation (U.S.A.)
BVE Bassin Versant Expérimental
BVR Bassin Versant Représentatif
CISAGRO Companhia Integrada de Serviços Agropecuários (de l'état de Pernambuco)
CNPq Conselho Nacional de Pesquisa
CNRS Centre National de Recherche Scientifique
DNAEE Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica
DNOCS Departamento Nacional de Obras contra as Secas
DPG Diretoria de Planejamento Global (de la SUDENE)
EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIT Front Intertropical
GVJ Groupe d'Etude du Val du Jaguaribe
IBAMA Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFOCS Inspeção Federal de Obras Contra as Secas (ancien DNOCS)
IOCS Inspeção de Obras Contra as Secas (ancien DNOCS)
ORSTOM Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
PAPP Programa de Apoio ao Pequeno Produtor rural (de la SUDENE)
PIREN Programme Intégré de Recherche pour l'Environnement
PLIRHINE Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste
PRN Programa de Recursos Naturais (de la SUDENE)
PROHIDRO Programa de Recursos Hídricos do Nordeste de la SUDENE
PRONI Programa Nacional de Irrigação
PROVÁRZEA Programa Nacional de Aproveitamento de Várzeas Irrigáveis
SCET-COOP Société Centrale pour l'Équipement du Territoire
SCS Soil Conservation Service (U.S.A.)
SUDENE Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TAPI Technologie Appliquée à la Petite Irrigation (Groupe de Coopération Technique Française à la SUDENE)
UFCE Universidade Federal do Ceará
UFPB Universidade Federal da Paraíba
UFPE Universidade Federal de Pernambuco
ZIC Zone de Convergence Intertropicale

BIBLIOGRAPHIE

- AGUIAR, F.G. de (1939) Boletim da Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS). v. 1-2, n.1, jul./set. 1939, pp. 03-15. Rio de Janeiro.
- AGUIAR, F.G. de (1940) Estudo Hidrométrico do Nordeste Brasileiro. IFOCS. Rio de Janeiro, jan/mar, 1940. v. 13, n. 1.
- AGUIAR, F.G. de (1940) Boletim Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS), v. 13, n.1, jan/maio 1940, pp. 03-56.
- ALBERGEL, A. (1987) Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 341 p.
- ASSUNÇÃO, M.S. de (1982) Bacia Representativa de Ibipeba. Relatório de Campanha 1979/80. Recife, SUDENE-DRN, 59 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 13) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- ASSUNÇÃO, M.S. de (1984) Bacia Representativa de Ibipeba. Relatório de Campanha 1980/81. Recife, SUDENE-DRN, 71 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 17). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- ASSUNÇÃO, M.S. de, LEPRUN, J.C., CADIER, E. (1984) Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido : Açu, Batateiras, Missão Velha e Quixabinha ; características físico-climáticas. (Síntese dos resultados). Recife, SUDENE-DRN-HME, 52p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 22). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- AUDRY, P., CADIER, E., LEPRUN, J.C., MOLINIER, M. (1987) ATP-PIREN. Projet : Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale. Rapport d'avancement des travaux. Recife. ATP-PIREN. ORSTOM, 78 p.
- BARRETO, F.H., LEPRUN, J.C., CADIER, E., CALVALCANTE, N. Ma. da C., HERBAUD, J. J. M. (1989) Classificação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas no Nordeste semi-árido. In : Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Foz do Iguaçu, V.1, p. 666-676. Paraná, Brasil.
- BERTON, S. (1988) La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits microbarrages en Afrique de l'Ouest. Paris, 474 p. il. Dossier n°12. GRET (Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques).
- BORGES, M.C. de A. (1977) Estudo hidro-agronômico de 47 açudes no Nordeste Brasileiro. Recursos Naturais, Meio ambiente e poluição. Rio de Janeiro, SUPREN, IBGE, v.1. p. 123-40.
- BRUNET-MORET, Y. (1965) Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Rapport de synthèse ORSTOM 1965. Publ. CIEH.
- BRUNET-MORET, Y. (1969) Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. 6, n°3, 90 p.
- BULTOT, F., DUPRIEZ, G.L., BODEUX, A. (1976) Interception potentielle journalière de la pluie par divers peuplements forestiers. J. Hydrol. n°31, pp. 381-392.
- BUREC (1987) Design of Small Dams. 856 p. Third edition. 2 maps cloth Bound.
- CADIER, E. (1984) Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN-HME, 75 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

- CADIER, E., ALBUQUERQUE, C.H.C de, ARAOJO FILHO, P.F., NASCIMENTO, P.H. de A., MONTGAILLARD, M. (1989) Dimensionamento de pequenos reservatórios superficiais do Nordeste semi-árido. In : VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABID, Foz do Iguaçu, Anais do..., v.1, pp. 202-225.
- CADIER, E., COCHONNEAU, G., GUSMÃO, A.C.S. (1981) Estudo estatístico das precipitações diárias no Estado de Pernambuco. In : Anais do IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, ABRH. v.1. pp. 414-22.
- CADIER, E., FREITAS, R.J. (1983) Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanhas 73/80. Recife, SUDENE-DRN, 180 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 14). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- CADIER, E., FREITAS, R.J. LEPRUN, J.C. (1983) Bacia Experimental de Sumé-PB ; instalação e primeiros resultados. In : Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Blumenau, ABRH, v. 1. pp. 69-90.
- CADIER, E., FREITAS, R.J. LEPRUN, J.C. (1983) Bacia Experimental de Sumé-PB ; instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE-DRN, 87 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 16).
- CADIER, E., MOLLE, F., ALBUQUERQUE, C.H.C. de, DOHERTY, F.R.O., MONTGAILLARD, M. (1990) Dimensionnement de petits barrages dans le Nordeste Brésilien semi-aride. Journées hydrologiques de Montpellier, 30 p.
- CADIER, E., POURRUT, P. (1979) Inventaire et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables. L'expérience de l'Equateur. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. v.16, n°3/4, pp. 171-211.
- CADIER, E., VIEIRA, H.J.P. (1985) Método de Avaliação dos Escoamentos nas Pequenas Bacias do Semi-árido. In : Anais VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos. Tomo I. pp. 217-230, São Paulo.
- CALVALCANTE, N.M. da. C., CADIER, E., DOHERTY, F.R.O. (1990) Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT. HME, 135 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 28). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- CAMPELLO, S. (1979) Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Brésil). Paris, ORSTOM, 121 p. il. Bibliografia, Thèse de doctorat présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- CAMPELLO, S., SANGUINETTI, P., VIEIRA, H.J.P., CADIER, E. (1983) Planificação, instalação e operação de uma rede de bacias representativas em fase de rotina : experiência da SUDENE. In : Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau. ABRH, v.1. pp. 25-38.
- CAMUS, H., CHAPERON, P., GIRARD G., MOLINIER, M. (1976). Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972. Travaux et Documents de l'ORSTOM n.52., 81p. + fig. + annexes.
- CARVALHO, M. PACHECO (1960) O Polígono das Secas. In. Boletim do DNOCS n°8, v.21, maio 1960.
- CASENAVE A., GUIGUEN, N., SIMON, J.M. (1982) Etudes des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale. Cah.ORSTOM, sér.Hydrol. 19, n°4, pp. 229-252.
- CASENAVE, A., VALENTIN C. (1989) Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.
- CAVIEDES, C N. (1973) "Secas and El Niño : Two simultaneous climatical hazards in South America". Proc Assoc Amer Geograph, 5, pp. 44-49.
- CHARNEY, J.G. (1975) Dynamics of desert and drought in the Sahel. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101, 193-202.
- CHEVALLIER, P. (1983) L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. Cah.ORSTOM, sér. Hydrol., v.20, n° 3/4, pp. 179-190.

- CHEVALLIER, P. (1988) Complexité hydrologique du petit-bassin versant : exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier, 306 p. + annexes.
- CHEVALLIER, P., LAPETITE, J.M. (1986) Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. *Hydrol. Continent.*, v.1 n°2, pp. 111-119.
- CHU, P.S. (1983) Diagnostic studies of rainfall anomalies in Northeast Brazil. *Mon. Weath. Rev.*, 111, 8-1655-1664.
- CIEH - Departement Hydrologie (1985) Etude des pluies journalières de fréquences rare dans les Etats membres du CIEH. Rapport de synthèse. CIEH, Ouagadougou, 22 p. + graph.
- COLLINET, J., VALENTIN, C. (1979) Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., v.18, n°4, pp. 283-328.
- CORREIA, F.N., MOREL-SEYTOUX, H.J. (1985) OMEGA : another physically-based rainfall model ? Hydrology days and 14th Annual Rocky Mountain Groundwater Conference (April 16-20, 1985). Fort Collins, Colorado. pp. 157-168.
- CUNHA (da), E. (1902) "Os sertões". Lib. Ediouro, Rio de Janeiro, Brasil. 363 p.
- DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Agricultural Research Service. Soil and water conservation Research Division (1986) . Field manual for research in agricultural hydrology. Washington D.C., 214 p. (Agriculture Handbook, 224).
- DNAEE (Departamento Nacional de aguas e Energia Elétrica) (1984) Mapa de disponibilidade hídrica do Brasil. Recife.
- DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) (1981) Plano Diretor do Vale do Pajeú. Recife.
- DOHERTY, F.R.O., CADIER, E., FRASSINETTE, P.F.A. (1991) Modélisation Hydrologique des petits bassins du Nordeste brésilien. SUDENE/ORSTOM. 150 p., (en cours de publication).
- DUBREUIL (1982) Application of results from representative and experimental basins. Paris, UNESCO 477 p.
- DUBREUIL, P. (1965a) Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. *Cah. ORSTOM*, sér. Hydrol. n°2.
- DUBREUIL, P. (1965b) Etude des précipitations appliquée à la mise en valeur hydro-agricole. Groupe d'étude du Val du Jaguaribe. Paris, ORSTOM.
- DUBREUIL, P. (1966) Un exemple d'estimation sur carte du volume total emmagasiné dans les petits réservoirs d'une région. In : Symposium de Garda A.I.H.S. Hydrologie des lacs et des réservoirs, 70. Garda, AIHS, v. 2. pp. 551-59.
- DUBREUIL, P. (1967) Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique. *Cah. ORSTOM*, sér. Hydrol., v.4, n°1, pp. 3-24.
- DUBREUIL, P. (1970) Le rôle des paramètres caractéristiques du milieu physique dans la synthèse et l'extrapolation des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs. In : Symposium sur les Résultats de Recherches sur Bassins Représentatifs et Expérimentaux. Wellington. AISH-Publication, 96.
- DUBREUIL, P. (1986) Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics. *J. Hydrol.*, 87, pp. 201-22.
- DUBREUIL, P., CAMPELLO, S. (1966) Normes climatiques et hydrologiques pour projets d'aménagements hydrauliques (bassin du Jaguaribe). ORSTOM, 28 p. multigr., 18 graph.

- DUBREUIL, P., CHAPERON P., GUISCAFRE J. (1972) Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
- DUBREUIL, P., GIRARD G. (1970). Influence de très nombreux petits réservoirs sur le module annuel d'une rivière tropicale (exemple pris dans le bassin du Jaguaribe au Brésil). Symp. Man-Made Lakes, Knoxville, Tennessee, USA. 10 p. dactylo. + 2 fig.
- DUBREUIL, P., GIRARD, G., HERBAUD, J.M. (1968) Monographie Hydrologique du Bassin du Jaguaribe (Ceará-Brésil). ORSTOM, Paris, 385 p.
- DUBREUIL, P., GUISCAFRE, J. (1971) La planification du réseau hydrométrique minimal. In : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. vol.8, n°2, p.3-37.
- DUBREUIL, P., MORELL M., SECHET P. (1975) Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 12, n°1, pp. 13-36.
- DUBREUIL, P., VUILLAUME, G. (1975) Influence du Milieu Physico climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. In : Symposium de Tokyo. Tokyo. Publication de l'AISH. n°117. pp. 205-15.
- DUNNE, T. (1978) Field studies of hillslope flow processes. In J. Kirkby (editor) Hillslope hydrology. John Wiley & Sons, pp. 227-293
- DUNNE, T. (1983) Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. In : I. Rodriguez-Iturbe and V.K.Gupta (guest-editors), Scale problems in hydrology. J. Hydrol., 65, pp. 25-48
- EMBRAPA (1991) En préparation. Zonage du Nordeste du Brésil.
- EMBRAPA, (1981) Seleção de áreas e construção de barreiros para uso de irrigações de salvação no trópico semi-árido. Circular técnica n.3. Petrolina (PE). Brasil.
- EMBRAPA. EMBRATER (1971) Região Nordeste. Semi-arido Brasileiro : Proposta de Implantação de Sistemas de Exploração de Propriedades Agrícolas para Assegurar a Convivência do Homem com a Seca. Anexo 1.
- EMBRAPA/SUDENE (1971) Ministério de Agricultura. Mapa exploratório. Reconhecimento de solos. Estado da Paraíba - 1/500 000. Recife.
- EMBRAPA/SUDENE (1972/3) Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, (1972, 359 p. Boletim Técnico, 26, v.1.)/(1973, 354 p. Boletim Técnico, 26, v.2).
- EMBRAPA/SUDENE (1973) Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 301 p. (Boletim Técnico, 28, v.1.)/(1973, 502 p. Boletim Técnico, 28, v.2.).
- FERREIRA FILHO, W.M., CADIER, E., MARTINS JUNIOR, C. (1989) Avaliação de escoamento e erosão na Bacia Experimental de Tauá-CE. In : VIII SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 8, Foz do Iguaçu, Anais do... S. Paulo. ABRH, 1989. v.1.
- FORTIN, J.P., CHARBONNEAU, R., LEFEVRE, J., GIRARD, G. (1971.) Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. AISH Publ. n. 101, v.2, Actes du Colloque de Varsovie, pp. 548-557.
- FOTIUS, G. (1983) Bacia Experimental de Sumé ; estratificação e composição da vegetação. In : Cadier, E., Freitas, B. J de & Leprun J. C. Bacia Experimental de Sumé ; instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE, pp. 46-53.
- FRANKEN, W., LEOPOLDO P.R., MATSUI E., GOES RIBEIRO M.N. (1982) Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. Acta Amazônica 12(2), 1982, pp. 327-331

- FRITSCH, J.M. (1990) Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en GUYANE FRANÇAISE. Thèse de doctorat, Montpellier II, 392 p. il.
- GALINDO, CARLOS ALBERTO P. M. (1980) Bacia Representativa de Tauá ; campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN-HME, 75 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 9). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- GALVÃO, C. de O. (1990) Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias. Tese de Mestrado, Campos II, Campina Grande, UFPB, 185 p.
- GIRARD, G. (1966) L'évaporation d'une nappe d'eau libre dans le bassin du Jaguaribe. Paris, ORSTOM, juillet, 44 p. + graph. (ronéo.).
- GIRARD, G. (1974) Etude de l'interception par la forêt aux îles Loyauté (Ile Lifou). Rap. ORSTOM, Paris, 9 p, 2 p. fig., 8 p. tab.
- GIRARD, G. (1975) Modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. 12, n°3, pp. 189-221.
- GIRARD, G. MORIN G., CHARBONNEAU R. (1972) Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol.9, n°4.
- GOMES FILHO, M.F., (1979) Um estudo sobre a influencia do albedo diferencial e da orografia na circulacao atmosferica : uma aplicacao'para o Nordeste brasileiro.
- GOMES, H. P., SRINIVASAN, V. S., CADIER, E. , GALVÃO, C. de O. (1987) Um estudo experimental do escoamento superficial e erosão na região semi-árida paraibana. In : Anais VII Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos. Salvador, ABRH, vol. 3, pp. 322-337.
- GOMES, J.M., SANTOS, M.F.dos. (1977) Bacia representativa do Riacho do Navio. I. Levantamento de reconhecimento de solos da bacia representativa do Riacho do Navio 1/100.000. II. Levantamento semi-detalhado de solos de uma sub-bacia do Riacho do Navio 1/25.000. Recife. SUDENE/Rec. solos. 84 p. il.
- GUSMÃO da SILVA, A.C., JACCON, G., SECHET, P. (1979) Banco de dados hidroclimatológicos do Nordeste. Recife, SUDENE-DRN, "Convênio SUDENE/ORSTOM". 15 p.
- GVJ (1965) Groupe d'Etude du val du Jaguaribe. Mise en valeur du bassin du Jaguaribe. Etudes générales de base, 1962-64. SUDENE, Recife et ASMIC, Paris. Tome IV - Les eaux de surface, rapport établi par la section hydrologique du GVJ sous la direction technique de l'ORSTOM ; V.1 - Introduction. Hydrologie de surface en région sédimentaire : les bassins représentatifs du Cariri, 156 p. V.2 - Hydrologie de surface en région cristalline : le bassin représentatif de Juatama, 116 p. V.2-bis - Hydrologie de surface en région cristalline : le bassin représentatif de Juatama, 90 p. V.4 - Aménagements hydro-agricoles des bassins de Quixabinha et Atalho : étude hydrologique, 87 p.
- HARGREAVES, G. (1973) Monthly precipitation probabilities for Northeast Brazil. S.L. University Utah State University, Department of Agricultural and Irrigation Engineering, 423 p.
- HARGREAVES, G. (1974) Potential evapotranspiration and irrigation requirements for Northeast Brazil. Utah State University. 55 p.
- HARGREAVES, G.H. (1975) Manual de requerimento de água para culturas irrigadas e agricultura seca. Logan, Utah State University, 41 p.
- HASTENRATH, S. (1990) Prédiction of Northeast Brazil rainfall anomalies J. Clim., 3, 8, 893-904.
- HERBAUD, J.J.M. (1983) inédit. Note sur la paramétrisation d'hyperboles pour le modèle hydrologique de simulation. SUDENE/ORSTOM. 15 p.
- HERBAUD, J.J.M., LINS, M.J.A, ASSUNÇÃO, M.S. de, CADIER, E. (1989a) Bacia Hidrográfica Representativa de Ibipeba. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT. HME, 219 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 27). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

- HERBAUD, J.J.M., MAGALHÃES, F.X. de, CADIER, E., CAVALCANTE, N.M. da C. (1989b) *Bacia Representativa de Juatama. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT. HME, 153 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 24). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".*
- HEWLETT, J.D., HIBBERT, A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In *forest Hydrology*, Sopper W. E. and Hull H.W. Ed., Pergamon Press : pp. 275-290.
- HEWLETT, J.D., NUTTER, W.L. (1970) The varying source area of streamflow from upland basins. In : *Proc. of the symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management*, Montana State University, Boseman, American Society of Civil Engineers, 65-83.
- HIEZ, G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques. In : *Cah.ORSTOM, sér.Hydrol., vol. 14, n°2*, pp. 129-172.
- HIEZ, G. (1978) *Processamento dos dados pluviométricos do Nordeste. 2a Parte A. Homogeneização dos dados. Método do Vetor Regional. Recife, SUDENE. DRN. HME, "Convênio SUDENE/ORSTOM".*
- HISARD, P. (1990) Variabilité des précipitations dans l'Atlantique tropical sud-est pendant un El Niño. *ORSTOM, Hydrol. continent., v. 5, n°2*, pp. 87-104.
- HORTON, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union, 14*, pp. 446-460
- IBIZA, D. (1983) Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique. Application : variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 20 n°1*, pp. 3-46
- IBIZA, D. (1984-1985a) Etude de l'infiltration au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Refus à l'infiltration par saturation des réserves souterraines. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 21, n°3*, pp. 17-50.
- IBIZA, D. (1984-1985b) Une fonction de production aux petits pas de temps. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. 221, n°3*, pp. 51-98.
- IBIZA, D. (1987) Transfert de surface : étude systématique du temps caractéristique des 0 (temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicale de 2 à 2 000 km². *Hydrol. Continent. v. 2, n°2*. pp. 101-115.
- JACCON, G., (1982) *As precipitações anuais da região paraibana. Homogeneização e análise regional. SUDENE/DRN-HME. Convênio SUDENE/ORSTOM. 97 p.*
- JACCON, G., SECHET, P. (1980) Base de données hydrologiques du nord-est brésilien. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 17, n.°3/4* pp. 177-219.
- KLEMES, V. (1986) Dilettantism in hydrology : transition or destiny ? *Wat. Resour. Res., 22(9)*, pp. 1775-1885.
- KOUSKY, V.E., (1985) Atmospheric circulation changes associated with rainfall anomalies over tropical Brazil. *Mon. Weath. Rev., 113, 11, 1951-1957.*
- L'HOTE, Y. (1987) Rappel de l'historique du cycle de l'eau dans la culture Occidentale. Son enseignement en France, hier et aujourd'hui. *Pub. AISH n°164*, pp. 37-46.
- LAFFORGUE, A. (1980) Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. 14, n°4*, pp. 300-345.
- LANNA, A. E. (1983) *Províncias hidrológicas e bacias representativas. In : Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau, ABRH, v.1, pp. 3-24.*

- LANNA, A. E. , SCHWARZBACH, M. (1989) Modhac - Modelo hidrológico auto-calibrável. Porto Alegre, IPH/UFRS.
- LARAQUE, A. (1989) Estudo e previsão da qualidade da água dos açudes do Nordeste semi-árido Brasileiro. Recife, SUDENE-DPG-PRN-HME, 91 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 26). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LARAQUE, A. (1991) Comportements hydrochimiques des "Açudes" du Nordeste brésilien semi-aride. Evolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, 324 p + annexes.
- LEPRUN, J.C. (1981) Relatório de Andamento do Convênio de Manejo e Conservação do solo no Nordeste Brasileiro. (1982-83). Recife, SUDENE-DRN-Recursos de solo, "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LEPRUN, J.C. (1983) Relatório de fim de Convênio de Manejo e Conservação do solo no Nordeste Brasileiro. (1982-83). Recife, SUDENE-DRN-Recursos de solo, 290 p. "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LEPRUN, J.C. (1984-1985) La conservation et la gestion des sols dans le Nordeste brésilien. Particularités, bilan et perspectives. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.21, n°4, pp. 257-284.
- LEPRUN, J.C. (1986) Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., v.22, n°2, pp. 223-233.
- LEPRUN, J.C., ASSUNÇÃO, M.S., CADIER, E. (1983) Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-climáticas. (Primeira síntese dos resultados obtidos). Recife, SUDENE-DRN-HME, 71 p. il. mapas. (Brasil. SUDENE. Hidrologia,15). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
- LINS, M. J.A. (1981) Bacia Representativa de Tauá; campanha 79/80. Recife, SUDENE-DRN, 60 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 10). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LINS, M. J.A. (1982) Bacia Representativa de Ibipeba; campanha 78/79. Recife, SUDENE-DRN, 59 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 12). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LINS, M. J.A. (1984) Bacias Representativas de Tauá. Relatório de campanha 1980/82. Recife, SUDENE-DRN, 81 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 19). "Convênio SUDENE/ORSTOM"
- MAKSOU, H. (1961) Estado atual do conhecimento dos recursos hídricos do Nordeste. Revista do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Rio de Janeiro, jan. 1961, ano 23, n°1, 119 p.
- MARKHAM, C.G., Mc LAIN, D.R. (1977) Sea surface temperature related to rain in Ceará, northeast Brazil. Nature, 265, pp. 320-323.
- MECHOSO, C.R., LYONS, S.W., SPAHR, J.A. (1990) The impact of sea surface temperature anomalies on the rainfall over Northeast Brazil. J. Clim., 3, 8, pp. 812-826.
- MEROT, P. (1988) Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation. Hydrol. continent., v. 3, n°2. pp.105-115.
- MICHEL, C. (1990) Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux, (*en préparation*), CEMAGREF, 529 p.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Groupe de travail permanent pour les barrages en aménagement rural. (1977) Techniques des barrages en aménagement rural. Paris, 325 p.
- MINISTERIO DAS MINAS E ENERGIA (1980) Mapa geológico do estado de Pernambuco : texto explicativo". Anexo mapa 1/500 000. DNPM. Recife. Brasil
- MOLINIER, M. (1981) Etude hydrologique des bassins de la Comba (République populaire du Congo). In : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 13, n°2/3, p.75-190.

- MOLINIER, M. (1985) Um mini-simulador de chuva ou infiltrômetro de aspersão. In : Anais do V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, São Paulo, 1985.
- MOLINIER, M., OLIVEIRA GALVÃO, C., PIMENTEL GOMES, H. (1987) Determinação do escoamento de uma bacia hidrográfica através das técnicas de simulação de chuva. In : Anais VI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Salvador, 1987.
- MOLINIER, M., AUDRY, P., DESCONNETS, J.C., LEPRUN, J.C. (1989a) ATP-PIREN : Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. "Projet : Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale" Rapport final - ORSTOM Recife, Brésil. 25 p. + annexes.
- MOLINIER, M., AUDRY, P., LEPRUN, J.C. (1989b) Modelagem do escoamento e da infiltração de um solo bruno do Nordeste semi-árido. In : Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, ABRH, v. 1, pp. 432-443.
- MOLINIER, M., CADIER, E. (1984-85) Les sécheresses du Nordeste brésilien. In : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI(4), 1984-1985. pp. 23-49.
- MOLINIER, M. (1991) Homogeneização e zoneamento da pluviometria anual no Nordeste. Convênio SUDENE/ORSTOM, Recife, (*en préparation*).
- MOLLE, F. (1989a) Evapotranspiração - Evaporação do tanque classe A - Evaporação nos pequenos açudes : Variações e correlações. In : Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Foz do Iguaçu, 1989.
- MOLLE, F. (1989b) Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 172 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 25). "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
- MOLLE, F. (1991a) Geometria dos pequenos açudes. Recife. SUDENE-PRN, 126 p. (Brasil, SUDENE, Hidrologia, 29) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- MOLLE, F. (1991b) Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento. Col. Mossoroense, Série C, v. 653, 171 p.
- MOLLE, F. (1991c) Caractéristiques et potentialités des "Açudes" du Nordeste brésilien, thèse de doctorat USTL, Montpellier, 362 p.
- MOLLE, F., CADIER, E. (1991) Manual do pequeno açude. SUDENE, Coopération Française, ORSTOM, il. 220 p., (*en cours de publication*).
- MONTGAILLARD, M. (1990), inédit. Note sur l'utilisation des fichiers MAPEDO et UNIMAP à l'aide des programmes CTL et OPTME, 10 p.
- MOREL-SEYTOUX, H.J. (1973a, 1973b, 1974, 1975) Pour une théorie modifiée de l'infiltration. In : Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 10, n°2, 1973a - 1^e partie : pourquoi? pp. 185-193; v. 10, n°3, 1973b - 2^e partie : comment ? pp. 199-209 ; v. 11, n°1, 1974 - 3^e partie : effets de compression et de contre-courant. pp. 51-59 ; v. 11, n°3, 1974 - 4^e partie : le drainage vu comme une infiltration d'air, pp. 181-187, v. 12, n°4, 1975 - 5^e partie : le cas de la pluie. pp. 227-233.
- MORTON, F.I. (1983) In : J. Hydrol. Operation estimates of lake evaporation. Paris, 66, pp. 1-76, A83.
- MOURA, A.D., SHUKLA, J. (1981) On the dynamics of droughts in Northeast Brazil : observations, theory and numerical experiments with a general circulation model.
- NIMER, E. (1973) Climatologia da região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geografia, Rio de Janeiro, IBGE, vol. 34, n°2, pp. 3-51.
- NOUVELOT, J.F. (1974) Planificação da implantação de Bacias Representativas. Aplicação à área da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN, 91 p. ilustr. Bibliografia original : Planification de l'implantation de bassins versants représentatifs. "Convênio SUDENE/ORSTOM".

- NOUVELOT, J.F. (1975) Caracteres físicos e morfológicos das bacias hidrográficas representativas. Boletim de Recursos Naturais, Recife, SUDENE, v.13, n.1/2, pp. 57-68.
- NOUVELOT, J.F., FERREIRA, P.A.S. (1977) Bacia representativa do Riacho do Navio : primeira estimativa dos recursos d'água. Recife. SUDENE-DRN-HME. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 4) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- NOUVELOT, J.F., FERREIRA, P.A.S., CADIER, E. (1979) Bacia Representativa do Riacho do Navio. Relatório Final. Recife, SUDENE-DRN-HME, 193 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 6). Bibliografia. "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- NOUVELOT, J.F., PEREIRA, F.C. (1977) Preparação do projeto de implantação de uma bacia representativa. Recife, SUDENE-DRN, 28 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 5) "Convênio SUDENE/ ORSTOM".
- PASSERAT, S.A. de, SILVA, T.C., ANDRADE, F.L.S., ALENCAR, R.T.S., GADELHA, C.L.M., SILVA, E.C. (1989) Efeito do albedo e da resistência estomatal sobre a evaporação das plantas aquáticas. Lisboa, 17 p. Trabalho apresentado no IV Simposio Luso-brasileiro de hidraulica e recursos hidricos.
- PEREIRA, F.C. (1978) Bacia Representativa de Ibipecta ; campanha 1976/1977. Recife, SUDENE-DRN, 31p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 3) "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- PFRAFSTETTER, O. (1957) Chuvas intensas no Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamento. (DNOS). Rio de Janeiro. 419 p.
- PIOGER, R. (1964) Hydrologie et géométrie comparées des réservoirs du Nordeste. Ressources en eau du Nord-Est du Brésil. Les eaux pluviales. Epta Programme. Recife, FAO, SUDENE, 185 p.
- POUYAUD, B. (1985) Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du Lac de Bam et de la Mare d'Oursi (Burkina Faso), du Lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. Thèse Université Paris Sud. 254 p.
- PUECH, C., CHABI-GONNI, D. (1984) Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits bassins en Afrique de l'Ouest et Centrale (2e édition). CIEH, Ouagadougou, 91 p.
- PUNGS, J.P., CADIER, E. (1985) Manual de Utilização dos Sistemas BAC e DHM. Banco de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN-HME, 139 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 23). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- RIBSTEIN, P. (1990) Modèles de crues et petits bassins versants au sahel. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier II. 317 p.
- RIBSTEIN, P., RODIER, J.A. (1989) Fortes crues des petits cours d'eau du Sahel : forme de l'hydrogramme. Hydrol. Continent., v. 4, n°1, pp. 33-47.
- RIOU, C. (1975) La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoires ORSTOM n°80, Paris, 236 p.
- ROCHE, M. (1963) Hydrologie de surface. Gauthier-Villars, ORSTOM, Paris, 430 p.
- ROCHE, M. (1967) Recherche d'un hydrogramme standard. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 4, n°1, pp. 27-44.
- ROCHE, M. (1972) Problèmes méthodologiques relatifs à la connaissance des crues. Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. 9, n°2, pp. 53-63.
- RODIER, J.A. (1976a) Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Etude préliminaire. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 13, n°4, pp. 243-263.
- RODIER, J.A. (1976b) Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v.13, n°4, pp. 269-306.

- RODIER, J.A. (1982) La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°2 pp. 115-127, Paris.
- RODIER, J.A. (1989) Ecoulements de surface dans les bassins perméables du Sahel. Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. ORSTOM, Hydrol. Continent. v.4 (2), pp. 123-138.
- RODIER, J.A., AUVRAY C. (1965) Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM - CIEH, Paris. 30 p.
- RODIER, J.A., RIBSTEIN, P. (1990) Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les bassins versants du SAHEL couvrant 1 à 10 km². ORSTOM, Montpellier, 133 p.
- ROPELEWSKI, C.F., HALPERT, M.S. (1989) Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. J. Clim. 2, 2, pp. 268-284.
- ROSENBROCK, H.H. (1960) An automatic method for finding the greatest or least value of a fonction. The Computer Journal, 3(3), pp. 175-184.
- S.C.S. (Soil Conservation Service) (1975) Urban Hydrology for small watersheds technical Release 55. Department of agriculture, U.S.A.
- SAKOUT, S., GUILBOT, A. (1988) Essais d'estimation des débits de pointe de crue à partir des caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants en région méditerranéenne : le cas du Languedoc-Roussillon. Hydrol.Continent., ORSTOM. v.3, n°1.
- SEGUIS, L. (1986) Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière (lame précipitée, lame écoulée). Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, 326 p.
- SEGUIS, L. (1987) Indice des précipitations antérieures et prédiction des crues au Sahel. In : Cah. ORSTOM, Hydrol. Continent., v.2, n°1, pp. 47-55.
- SERVAIN, J., SEVA, M., RUAL, P. (1990) Climatology comparison and long-term variations of sea surfaces temperature over the tropical Atlantic Ocean. I. Geoph. Res. 6, pp. 9421-9432.
- SERVAT, E., DEZETTER, A. (1990) Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'un modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. ORSTOM, Hydrol. Continent., v.5(2), pp. 147-165.
- SHERMAN, L.K. (1932) Streamflow from rainfall by the unit graph method. Engin. News. Rec, 108 , pp. 501-505.
- SOPPER, W.E., LYNCH, J.A. (1970) Changes in water yield following partial forest cover removal on an experimental watershed. In "Results of research on representative and experimental basins". Proceedings of the Wellington Symposium, Pub. IAHS n° 96, pp. 369-389.
- SRINIVASAN, V.S., GOMES, H.P., LEPRUN, J.C., SILVA, I.G. (1988) Erosion studies in Sumé a semi-arid region of Brazil. In : Sediment Budgets (Proceedings of Porto Alegre Symposium), Porto Alegre, IAHS, pp. 307-314. IAHS Publ. n°174.
- SUDENE (1971) Inventário hidrogeológico básico do Nordeste : folha n. 14. 1/500 000.
- SUDENE (1971) Inventário hidrogeológico básico do Nordeste : folha n. 15, Jaguaribe-SE, Recife, 187 p. sér. Brasil, 32. 1/500 000.
- SUDENE (1980) Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil. (PLIRHINE-FASE I). Recife, 32 volumes.
- SUDENE, GVJ (1967) Estudo Geral de Base do Vale do Jaguaribe. Recife/PE, SUDENE/ASMIC, v.5, Monografia Hidrológica, Bibliografia.
- SUDENE. Divisão de Hidrogeologia. (1968) Mapa hidrogeológico do Nordeste (folha 9). Recife. 178 p.

- SUDENE/CISAGRO/COOPERAÇÃO FRANCESA/ORSTOM (1988) Estudo da Pequena açudagem na Região do Alto Pajéu/PE. Recife, SUDENE. 118 p.
- SUDENE/CISAGRO/COOPERAÇÃO FRANCESA/ORSTOM (1989) Estudo da pequena açudagem no agreste meridional. Recife.
- THEBE, B., PONTANIER, R. (1989) Etude du ruissellement au Nord Cameroun. Transfert de la parcelle au bassin versant. In : Cah. ORSTOM, Hydrol. Continent., vol.4(1).
- TOEBES, C., OURYVAEV, V. (1970) Les bassins représentatifs et expérimentaux. Guide International des pratiques en matière de recherche. UNESCO, Etudes et rapports d'hydrologie n°4, 380 p.
- TUCCI, C.E.M. (1987) Modelos determinísticos. In : Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. Nobel/ABRH, pp. 211-324.
- TURC, L. (1954-55) Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agron. 5, pp. 491-509; 6, pp. 5-131
- VAN TE CHOW (1964) Handbook of Applied Hydrology. Mac Graw Hill Book Company, New York, 1530 p.
- VIANA, F.L., (1977) Bacia representativa de Juatama. Campanha 1975-76. Fortaleza, ATECEL.
- VIANA, F. L. (1986) Comportamento hidrológico das pequenas bacias do Nordeste, Fortaleza, UFC, 166 p. Dissertação de Mestrado.
- VIEIRA, H.J.P., CADIER, E., LINS, M.J.A. , ASSUNÇÃO, M.S. (1983) Descrição da Rede de Bacias Representativas e Experimentais do Nordeste brasileiro. In : V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH, Blumenau, Anais do Fortaleza, v. 1, pp. 39-66.
- VUILLAUME, G. (1974) L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calculs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 11, n°3, pp.205-240.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion Losses ; a guide to conservation and planning. Washington, U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 537.
- ZELAQUETT, G. J. (1980) Bacia Representativa de Açú ; relatório de campanha 1977/1978 e complementação do relatório de instalação. Recife, SUDENE-DRN, 99 p. il. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 8). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES NON-CITEES
--

- BRET, B. (1989) "Les hommes face aux sécheresses - Nordeste brésilien, Sahel africain". IHEAL & EST - Samuel Tastet Ed. Mayenne. 422 p.
- BRUNET, S. (1986) *Le Nordeste brésilien. Les véritables enjeux*. Publication de la Fondation Liberté sans Frontières. Paris. 44 p.
- CADIER, E., LANNA, A.E., MENEZES, M., M.S. CAMPELLO (1987) *Avaliação dos Estudos referentes aos Recursos Hídricos das Pequenas Bacias do Nordeste Brasileiro*. In : *Anais VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos, Salvador/BA*.
- CASTRO, J. (1965) *Une zone explosive, le Nordeste du Brésil*. Ed. Esprit Seuil. Paris. 225 p.
- CHEVALLIER, P. (1985) *Analyse et modélisation du ruissellement en région sahéenne (Mare d'Oursi, Burkina Faso)*. *La Houille Blanche* n° 6/7, pp. 573-580.
- CHEVALLIER, P., CLAUDE, J., POUYAUD B., BERNARD A. (1985) *Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976-1981. Travaux et Documents de l'ORSTOM* n.190. 256 p.
- CONDEPE (Companhia de Desenvolvimento de Pernambuco) (1978) *Plano Diretor para o Desenvolvimento Integrado da Bacia do Rio Capibaribe*. Recife.
- CORMARY, Y., GUILBOT, A. (1971) *Ajustement et réglage des modèles déterministes. Méthodes de calage des paramètres*. *La Houille Blanche* 2/1971, pp. 131-140.
- DOOREMBOOS, J., PRUITT, W.O. (1977) *Crop water requirements*. Rome, F.A.O., 178 p. (Irrigation and Drainage, série 24).
- DUBREUIL, P. (1982). *Estimation of water resources characteristics ; introduction*. In : UNESCO. *Application of results from representative and experimental basins*. Paris, UNESCO, pp. 15-26.
- DUBREUIL, P. (1985a) *Review of field observations of runoff generation in the tropics*. *J. Hydrol.*, 80 pp. 237-264.
- DUBREUIL, P. (1985b) "Quelques problèmes de l'eau rencontrés au Brésil". Ed. *La houille blanche* n°2, Paris. pp. 112-122.
- DUQUE, J.G. (1975) *Solo e água no polígono das secas*. 4e ed., Fortaleza. DNOCS, Publicação 154, série I-A : 122 p.
- DUQUE, J.G. (1973) *O Nordeste e as lavouras xerófilas*. Fortaleza. Banco do Nordeste do Brasil.
- GIRARD, G. (1981) *Etude des ressources en eau d'une région comportant des aménagements hydrauliques (application aux bassins du polygone de la sécheresse du Nord-Est du Brésil)*. C.I.G. Fontainebleau. ORSTOM, Bureau Central d'Hydrologie, Bondy. 25 p.
- HARR, R.D., HARPER, W.C., KRUGIER, J.T., HSIEH F.S. (1975) *Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range*. *Wat. Resour. Res.*, 11(3), pp. 436-444.
- IBBIT, R. P., O'DONNELL, T. (1971) *Fitting Methods for conceptual catchment models*. *Journal of the hydraulics division, Proc. ASCE*, 97 (HY9), pp. 1331-1342.
- IBIZA, D. (1984-1985c) *Point de vue sur les fonctions de production*. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, v. 21, n°3, pp. 5-15.

- JACCON, G. (1980) Processamento dos dados pluviométricos do Nordeste. Convênio SUDENE/ORSTOM.
- KIRKBY, M. (1988) Hillslope runoff processes and models. *J. Hydrol.*, 100, pp. 315-339.
- KOVNER, J.L., EVANS, T.C. (1954) A method for determining the minimum duration of watershed experiments. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 35, pp. 608-612.
- MARWELL FILHO, P., LANNA, A. E. (1986) MOHTSAR : um modelo hidrológico, *Caderno de Recursos Hídricos*. 4(1), pp. 95-118.
- MARWELL FILHO, P., LANNA, A.E. (1987) MOHTSAR, un modèle hydrologique pour le Tropicque semi-aride.
- MOALLEMI-POUR, A., MICHEL, C. (1989) Contribution à une meilleure estimation des paramètres d'une crue décennale : la méthode "DELTAQIX". *ORSTOM, Hydrol. continent.*, v.4, n°2, pp. 113-122.
- MOLLE, F. (1985) Potencialités des açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation. Rapport ENGREF. Montpellier, France, 142 p.
- MOLLE, F., CADIER, E. (1986) Potencial dos Açudes e Dimensionamento dos Perímetros Irrigados. *Revista Brasileira de Irrigação e Drenagem*. ABID.
- MOLLE, F., COURCIER, R., CADIER, E. (1988) Quelques aspects de la petite irrigation dans le Nordeste Brésilien. In : *Les Cahiers de la Recherche Développement*, n° 19, sept. 1988.
- MOLLE, F., MEDEIROS, R.D., DOHERTY, F. R.O. et al. (1989) Perdas por infiltração nos pequenos açudes. In : *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Foz do Iguaçu, 1989.
- MONIOD, F. (1969) Calcul automatique des paramètres de l'Hydrogramme Standard. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, vol. VI, n°2, pp. 77-98.
- MONIOD, F. (1983) Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XX, 3/4, pp. 191-203.
- NASCIMENTO, S. R., CADIER, E., MOLLE, F., DOHERTY, F.R.O. (1987) POMAC : Um sistema automatizado de simulação de pequeno perímetro de irrigação alimentado por açude. In : *VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Anais do...* ABRH, Salvador, 1987. V. 1, pp. 382-394.
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models ; Part I - A discussion of principles ; *J. Hydrol.*, 10, pp. 282-290.
- PICK-UP, G. (1977) Testing the efficiency of algorithms and strategies for automatic calibration of rainfall-runoff models. *Hydr. Scienc. Bull.*, XXII, 2 6/1977, pp. 257-274.
- PILGRIM, D. H. (1986) Bridging the gap between flood research and design practice. *Wat. Resour. Res.*, 22(9), pp. 1655-1765.
- PILGRIM, D.H. (1983) Some problems in transferring hydrological relationships between small and large basins and between regions. In : I. Rodriguez-Iturbe and V.K. Gupta (guest-editors), *Scale problems in hydrology*. *J. Hydrol.*, 65, pp. 49-72.
- REBOUÇAS, A. da C., (1973) Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil. Evaluation des ressources. Orientations pour la mise en valeur. Thèse de Doctorat d'Etat et Sciences (A.O.8639). Université Louis Pasteur de Strasbourg. 291 p.
- REBOUÇAS, A. da C., MARINHO, E. (1972) Hidrologia das secas. Nordeste do Brasil. Recife, (Série Brasil. SUDENE. Hidrogeologia, 41).
- ROCHE, M.A. (1981) Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à ECEREX en Guyane. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* 19, v. 2., pp. 81-114, Paris.

- ROCHE, M.F (1986) Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Masson, Paris, 288 p.
- RODIER, J.A (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Toulouse. ORSTOM, Paris, 137 p.
- RODIER, J.A. (1967) Présentation de toutes les crues de faible fréquence étudiées par les hydrologues de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., v. 4, n°1, pp. 79-85.
- RODIER, J.A. (1984-1985) Caractéristiques des crues de petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°2.
- SANGUINETTI, P.A., CADIÉ, E. (1981) Avaliação dos recursos hídricos para pequenos aproveitamentos em zonas semi-áridas do Nordeste : estudo de Bacias Representativas e Experimentais. In : IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, v. 3, pp. 223-36.
- SECRETARIA DE ENERGIA E RECURSOS MINERAIS (1982) Mapa geológico do Estado da Paraíba - 1/500 000. Recife.
- SERVAIN, J., PICAUT, J., MERLE, J. (1982) Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic ocean. J. Phys. Ocean., 12, pp. 457-463.
- SHERMAN, L.K. (1941) The unit hydrograph and its applications. Bull. Ass. State Eng. Soc., vol. 17, pp. 4-22.
- SIMMERS, I. (1975) The use of regional hydrology concepts for spatial translation of stream flow data. AISH. Publication n°117. Symposium on the Hydrological Characteristics of River Basins, Tokyo.
- SIQUEIRA, L. (1964) Aspectos hidrogeológicos do Cariri paraibano. SUDENE Boletim de Recursos Naturais, Recife, 2(1/4), pp. 11-44.
- SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. J. (1985) The analysis of structural identifiability : theory and application to conceptual rainfall-runoff models. Wat. Resour. Res., 21(4), pp. 487-495.
- SWANK, W. T., HELVEY, J.D. (1970) Reduction of streamflow increases following regrowth of clearcut hardwood forests. In "Results of research on representative and experimental basins". Proceedings of the Wellington Symposium, pub. IAHS n°96, pp. 346-360.
- THEBE, B. (1987) Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse USTL, Montpellier, 306 p.
- THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.C. (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Centertan, Drexel Institut of Technology (Publications in Climatology, 3).

TABLE DES MATIERES

Avant-Propos	3
Résumé	5
Introduction.....	9
1. Contexte naturel et histoire de l'hydrologie des petits bassins.....	11
1.1 Contexte naturel du Nordeste du Brésil	11
1.1.1 Les mécanismes du climat : Pourquoi y a-t-il une zone sèche ?	15
1.1.2 Les précipitations	19
1.1.3 Les sécheresses.....	22
1.1.4 Les sols de la zone semi-aride.....	24
1.1.5 Les açudes.....	26
1.2 Histoire de l'hydrologie des petits bassins du nordeste	29
1.2.1 Données antérieures à 1963 : le réseau hydropluviométrique général	29
1.2.2 Les années 60 : l'étude du Val du Jaguaribe ; les premières études sur petits bassins versants	30
1.2.3 Les années 70 : planification et installation d'un réseau de Bassin Versants Représentatifs.....	31
1.2.4 Les années 80 : la diversification.....	34
1.2.4.1 Ralentissement du Programme de Bassins Versants Représentatifs (BVR)	34
1.2.4.2 Les bassins expérimentaux.....	36
1.2.4.3 L'étude des açudes.....	38
1.2.5 Information hydrologique fournie par les différents programmes.....	41
2. Techniques hydrologiques utilisées.....	45
2.1 Problématique et spécificité de l'hydrologie des petits bassins.....	45
2.1.1 Pourquoi étudier les petits bassins ?	45
2.1.2 Contraintes et techniques propres aux petits bassins.....	47
2.1.2.1 Métrologie.....	47
2.1.2.2 Hétérogénéité des petits bassins	49
2.1.2.3 Notion de représentativité, nécessité de planification.....	50
2.1.2.4 Techniques d'homogénéisation, d'extension de série et de modélisation	51
2.1.2.5 Interprétation des résultats et élaboration de synthèses régionales.....	51
2.2 Concepts et schémas actuels de l'hydrologie des petits bassins : résumé bibliographique	53
2.3 Techniques d'étude utilisées dans le Nordeste brésilien.....	57
2.3.1 Planification initiale du réseau de bassins versants représentatifs	57
2.3.1.1 Planification effectuée par NOUVELOT en 1974	57
2.3.1.2 Pertinence du zonage et de la planification réalisée par NOUVELOT	59
2.3.1.3 Comment planifierions-nous aujourd'hui ?	62
2.3.2 Installation d'un bassin versant représentatif.....	65
2.3.3 Gestion en routine des bassins versants.....	71
2.3.4 Fonctionnement du dispositif et résultats obtenus	72
3. Description des bassins versants représentatifs du Nordeste brésilien.....	77
3.1 Le bassin représentatif de TAUA.....	78
3.1.1 Historique	78
3.1.2 Description du bassin	79
3.1.3 Dispositif de mesure installé.....	85
3.1.4 Résultats obtenus	88
3.1.5 Interprétation : Les acquis du bassin de TAUA.....	92
3.1.5.1 Principaux types de comportements hydrologiques	92
3.1.5.2 Description des principaux groupes:	93
3.1.5.3 Variation des lames écoulées sur un ensemble de bassins emboîtés	95
3.1.6 Conclusion du bassin de TAUA.....	96
3.2 Le bassin représentatif de SUME.....	98

3.2.1	Historique	98
3.2.2	Description du bassin	99
3.2.3	Dispositif de mesure installé.....	107
3.2.3.1	Bassin représentatif: 1974-1989.....	107
3.2.3.2	Bassin expérimental: 1981-1990	109
3.2.3.3	Action thématique programmée ORSTOM/CNRS/SUDENE/UFPB.....	115
3.2.4	Résultats obtenus sur l'ensemble du dispositif:	115
3.2.5	Conclusions: les acquis du bassin de SUME:.....	118
3.2.5.1	Variation des lames écoulées en fonction de la végétation	118
3.2.5.2	Variations des écoulements entre microbassins semblables	119
3.2.5.3	Lames écoulées sur les Bassins Représentatifs.....	119
3.3	Le bassin représentatif du RIACHO DO NAVIO.....	121
3.3.1	Historique et description du bassin	121
3.3.2	Dispositif de mesure	128
3.3.3	Résultats obtenus	130
3.3.4	Interprétation : les acquis du bassin du RIACHO DO NAVIO :	133
3.3.4.1	Les régimes hydrologiques.....	133
3.3.4.2	Tentative d'ajustement d'un modèle simplifié utilisant un indice pluviométrique :.....	135
3.3.4.3	Fonctionnement de l'açude CONCEIÇÃO. Une étude de cas.	136
3.3.5	Conclusions du bassin de RIACHO DO NAVIO	138
3.4	Le bassin représentatif de JUATAMA.....	139
3.4.1	Historique	139
3.4.2	Description du bassin	141
3.4.3	Dispositif de mesure	146
3.4.4	Résultats obtenus.	146
3.4.5	Conclusions et interprétation ; les acquis du Bassin de JUATAMA.....	150
3.5	Le bassin représentatif d'IBIPEBA.....	151
3.5.1	Historique et description du bassin	152
3.5.2	Dispositif de mesure	157
3.5.3	Résultats obtenus	159
3.5.4	Conclusions: Les acquis du bassin d'IBIPEBA.....	161
3.5.4.1	Les modules annuels.....	161
3.5.4.2	Principaux régimes hydrologiques	161
3.5.4.3	Le paradoxe des crues :.....	162
3.5.4.4	Les pertes dans le réseau hydrographique.....	162
3.5.4.5	L'amélioration des connaissances hydrologiques régionales.....	163
3.6	Conclusion de la troisième partie:	164
4.	Transposition des écoulements annuels.....	167
4.1	Objectifs et stratégie.....	167
4.2	Modélisation hydrologique des petits bassins versants représentatifs du "Nordeste"	170
4.2.1	Algorithmes utilisés par le modèle SUDENE-ORSTOM.	171
4.2.2	Présentation d'un exemple d'ajustement.	174
4.2.2.1	Initialisation et démarrage.....	174
4.2.2.2	Les programmes de calage.	176
4.2.2.3	Présentation d'un exemple de modèle ajusté.	178
4.2.3	Ajustements réalisés ; Validation.....	184
4.2.3.1	Critères d'ajustement.....	184
4.2.3.2	Validation des modèles.	186
4.2.3.3	Paramètres principaux des modèles.	188
4.3	Choix des pluviomètres pour la transposition spatiale.....	190
4.3.1	Zonage pour les pluies en 24 h.....	190
4.3.2	Critique des données pluviométriques	191
4.3.2.1	Sélection des pluviomètres.....	191
4.3.2.2	Attribution d'une classe de qualité aux 156 pluviomètres sélectionnés.	191
4.3.3	Zonage pluviométrique.	194
4.3.3.1	Méthode employée - Définition des "faciès" du régime hydrologique.	194
4.3.3.2	Définition de deux grandes zones climatiques.....	195

4.3.3.3	Forme de la relation pluie-écoulement annuels.....	195
4.3.3.4	La grande zone climatique du Sertão.....	198
4.3.3.5	La grande zone climatique de Transition.....	203
4.3.4	Sélection finale des pluviomètres.....	206
4.4	L'abattement des pluies.....	209
4.1	Rappel théorique.....	209
4.2	Coefficient d'abattement proposé pour les fortes pluies.....	209
4.3	Correction pour les faibles pluies.....	210
4.4	Formules de correction proposées.....	211
4.5	Discussion - Pertinence de l'abattement.....	212
4.5	Typologie des bassins.....	214
4.5.1	Caractérisation et regroupement de bassins.....	214
4.5.1.1	L'abondance : la moyenne des écoulements.....	214
4.5.1.2	Les "faciès" des régimes : variabilité et regroupements de bassins.....	217
4.5.2	Caractérisation numérique des régimes.....	223
4.5.3	Recherche des facteurs conditionnels des modules.....	229
4.5.3.1	Présentation des paramètres physiques étudiés.....	229
4.5.3.2	Corrélations entre les paramètres physiques, morphologiques et des modèles.....	232
4.5.3.3	Analyse en composantes principales du rôle des différents paramètres.....	239
4.5.3.4	Calcul de L600 par la méthode du Stepwise.....	242
4.5.4	Première tentative de transposition.....	244
4.6	Utilisation des données du réseau général.....	246
4.6.1	Pourquoi utiliser les données du réseau général ? Objectifs et stratégie.....	246
4.6.2	Sélection des données des bassins du réseau général et homogénéisation.....	247
4.6.3	Introduction de l'information pédologique et pluviométrique.....	252
4.6.3.1	Mise en forme de l'information pédo et pluviométrique: les fichiers UNIMAP et MAPEDO.....	252
4.6.3.2	Typologie des sols : définition des groupes de sol.....	256
4.6.4	Calcul des valeurs de L600 des sous-groupes de sol.....	256
4.6.4.1	Principe de la méthode d'optimisation.....	256
4.6.4.2	Réalisation de l'optimisation: discussion, précautions et artifices.....	258
4.6.4.3	Résultats obtenus: les valeurs de L600, base de la transposition.....	258
4.6.4.4	Importance relative des facteurs explicatifs "sol" et "pluie".....	266
4.6.4.5	Tentative de mise en évidence d'autres facteurs explicatifs.....	267
4.6.5	Adaptation de la formule aux petits bassins.....	269
4.6.5.1	Influence de la couverture végétale (correction CV).....	269
4.6.5.2	Correction due à la présence d'açudes dans le bassin versant (correction CA).....	272
4.6.5.3	Influence de zones de rétention situées sur le parcours de l'eau (correction CL).....	274
4.6.5.4	Rôle de la surface.....	275
4.6.6	Validation.....	276
4.6.6.1	Validation à l'aide des résultats obtenus sur les bassins représentatifs.....	276
4.6.6.2	Comparaison de la formule SUDENE/ORSTOM avec la formule d'AGUIAR.....	281
4.6.7	Conclusions sur l'utilisation des données du réseau général.....	284
5.	Transposition des caractéristiques des crues.....	285
5.1	Revue bibliographique.....	286
5.2	Méthode, objectifs et stratégie.....	289
5.3	Information disponible.....	291
5.3.1	Résumé des caractéristiques des crues des petits bassins du Nordeste :.....	291
5.3.2	Les gammes de surface : les temps de concentration.....	292
5.4	Formules proposées pour la transposition des crues pour les zones cristallines.....	294
5.4.1	Surfaces de bassins comprises entre 5 et 500 km ²	294
5.4.1.1	Variations de Kx en fonction de la surface.....	294
5.4.1.2	Variations de la lame de la crue décennale en fonction de la surface.....	294
5.4.1.3	Formule de calcul du débit de la crue de projet.....	297
5.4.2	Surfaces de bassins comprises entre 0,1 et 5 km ²	298
5.4.3	Surfaces supérieures à 500 km ²	299
5.4.4	Relation entre les temps caractéristiques des hydrogrammes.....	300

5.5	Discussion : les facteurs correctifs des crues.....	302
5.5.1	Correction à apporter quand le bassin est sédimentaire.	302
5.5.2	Les autres facteurs correctifs.....	304
5.5.3	Validation.....	308
6.	Conclusion générale.....	311
6.1	Nos choix, nos priorités et notre action.....	311
6.2	Fonctionnement des bassins représentatifs.....	313
6.3	Estimation des écoulements annuels.....	315
6.4	Estimation des crues.....	317
6.5	Perspectives et priorités pour la recherche hydrologique.....	318
 ANNEXES		
	Annexe 1 : Méthode de transposition hydrologique, proposée dans le "Manuel du Petit Açude"	325
	Annexe 2 : Information existante sur les autres bassins représentatifs.....	345
	Annexe 3 : Liste et qualité des pluviomètres sélectionnés.....	361
	Annexe 4 : Fonctionnement du Modèle SUDENE/ORSTOM avec des pluviométries africaines	367
	Annexe 5 : Glossaire	371
	 Bibliographie.....	 373
	 Table des Matières.....	 387
	 e des Figures.....	 391
	 Liste des Tableaux.....	 395

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Contexte naturel et histoire de l'hydrologie des petits bassins

1.1	Carte de situation du Nordeste brésilien	11
1.2	Grandes zones physiographiques du Nordeste	13
1.3	Schéma d'interaction de la ZCIT avec les autres zones de convergence.....	16
1.4	Conditions d'apparition d'un front froid dans le Sud du Nordeste	16
1.5	Les systèmes de circulation atmosphériques et les principaux effets orographiques.....	18
1.6	Précipitation moyenne annuelle.....	20
1.7	Quelques distributions mensuelles des précipitations du Nordeste brésilien	21
1.8	Précipitation maximale en fonction de sa durée et de sa période de retour	22
1.9	Chronique des indices pluviométriques pour l'ensemble du Nordeste.....	23
1.10	Situation de différents sols par rapport au relief le long d'une coupe caractéristique du Nordeste	25
1.11	Carte des risques d'érosion du Nordeste brésilien	26
1.12	Irrégularité des écoulements sur un petit bassin.....	27
1.11	Densité d'açudes dans la région de CAICO.....	28
1.12	Carte de situation des bassins représentatifs du Nordeste brésilien	33
1.13	Nombre d'appareils installés par les différents programmes.....	42

Chapitre 2 : Techniques hydrologiques utilisées

2.1	Les zones hydrologiques homogènes du Nordeste brésilien.....	61
2.2	Comparaison de deux types de zonage	63
2.3	Séquence de sol fréquente dans une unité de paysage de l'EMBRAPA.....	64
2.4	Erreur de lecture limnimétrique fréquente	73

Chapitre 3 : Description des bassins versants représentatifs du Nordeste brésilien

3.1.1	Carte des sols du bassin représentatif de TAUA.....	81
3.1.2	Bassin représentatif du TAUA : Réseau de mesure hydro-pluviométrique et délimitation des bassins versants	86
3.1.3	Croquis de situation des installations du bassin expérimental de TAUA	87
3.2.1	Esquisse géologique du bassin de SUME.....	101
3.2.2	Carte des sols du bassin de SUME.....	102
3.2.3	La complexité de la répartition et du fonctionnement des sols du bassin expérimental de SUME	104
3.2.4	Réseau de mesure de l'açude SUME.....	108
3.2.5	Réseau hydropluviométrique et hydrologique du BVR de SUME	109
3.2.6	Croquis de situation du bassin expérimental de SUME	111
3.2.7	Fosse à sédiment des micro-bassins	114
3.2.8	Réservoirs collecteurs des parcelles de WISHMEIER.....	114
3.3.1	Esquisse géologique du bassin du RIACHO DO NAVIO.....	124
3.3.2	Esquisse pédologique du bassin du RIACHO DO NAVIO	125
3.3.3	Carte des sols de la partie orientale du bassin du RIACHO DO NAVIO	126
3.3.4	Réseau hydropluviométrique du bassin du RIACHO DO NAVIO.....	129
3.3.5	Dispersion de la relation entre les pluies et les écoulements annuels	131
3.3.6	Liaison entre la pluie (Pm), l'écoulement des crues (Ls) et l'indice de saturation hydrique préalable du bassin (IK)	132
3.3.7	Simple accumulation des lames écoulées à la station de SALOBRO.....	134
3.3.8	Rabaissement de l'açude CONCEICAO en fonction de l'évaporation bac et de la profondeur de l'açude	137
3.3.9	Variations du niveau de l'açude CONCEICAO	138
3.4.1	Cartes des sols du bassin de JUATAMA	142
3.4.2	Toposéquence typique de la région de JUATAMA.....	143

3.4.3 Réseau hydropluviométrique du bassin de JUATAMA.....	147
3.4.4 Liaison entre la pluie (Pm), l'écoulement des crues (Ls) et l'indice de saturation hydrique préalable du bassin (IK).....	149
3.5.1 Carte des sols du bassin d'IBIPEBA.....	157
3.5.2 Réseau hydropluviométrique et açudes du bassin d'IBIPEBA.....	158

Chapitre 4 : Transposition des écoulements annuels

4.1.1 Principales étapes de l'élaboration d'une méthode de transposition des écoulements annuels dans le Nordeste du Brésil.....	169
4.2.1 Paramétrisation des hyperboles.....	172
4.2.2 Principales étapes de l'ajustement.....	175
4.2.3 Relation entre la pluie (Pm), l'écoulement (Ls) et l'indice de saturation antérieure (IK).....	176
4.2.4 Correction automatique par événement.....	179
4.2.5 Comparaison des valeurs mensuelles des écoulements calculés et observés.....	183
4.2.6 Comparaison des valeurs journalières des écoulements calculés et observés.....	183
4.2.7 Validation du modèle pour CALDEIRAO.....	187
4.3.1 Zonage pluviométrique initial (en cartouche).....	192
4.3.2 Situation des 156 pluviomètres analysés.....	192
4.3.3 Mise en évidence des deux grandes zones climatiques.....	196
4.3.4 "Grandes" zones pluviométriques.....	197
4.3.5 Analyse des composantes du régime pluviométrique de la zone Sertão.....	200
4.3.6 Les composantes du régime pluviométrique. Regroupement des pluviomètres.....	201
4.3.7 Mise en évidence de l'abondance de la zone 6.....	203
4.3.8 Analyse en composantes principales du régime pluviométrique de la zone de Transition.....	204
4.3.9 Comparaison des écoulements des zones 8 et 9.....	205
4.3.10 Distorsion induite par la sélection des pluviomètres.....	208
4.4.1 Coefficient d'abattement en fonction de la surface du bassin et de la période de retour de la pluie ponctuelle.....	210
4.4.2 Variation du coefficient d'abattement en fonction de la pluie journalière (pour un bassin de 500 km ²).....	210
4.5.1 Comparaison des coefficients L600 des deux zones climatiques.....	214
4.5.2 Comparaison des coefficients A des deux zones climatiques.....	216
4.5.3 Coefficient L600 en fonction de A, pour la zone climatique Sertão.....	217
4.5.4 Typologie des bassins: a) analyse des composantes.....	218
4.5.4 Typologie des bassins: b) regroupement des bassins.....	219
4.5.5 Typologie des bassins: Régularité et abondance.....	222
4.5.6 Exemple de deux régressions entre "faciès" du régime et module.....	223
4.5.7 "faciès" du régime en fonction du module, pour les différents groupes de bassins.....	225
4.5.8 Evolution du "faciès" du régime selon le groupe de bassins.....	226
4.5.9 Evolution du "Faciès" du régime selon la pluviométrie annuelle moyenne.....	226
4.5.10 Evolution du "Faciès" du régime selon la "Grande Zone climatique".....	227
4.5.11A Corrélation entre paramètres caractéristiques des bassins.....	237
4.5.11B Corrélation entre paramètres caractéristiques des bassins.....	238
4.5.11C Niveau de signification des coefficients de corrélation.....	239
4.5.12 Analyse en composantes principales du rôle des différents paramètres. a) Analyse des composantes.....	240
4.5.12 Analyse en composantes principales du rôle des différents paramètres. b) Regroupement de bassins.....	241
4.5.13 Calcul de L600 par la méthode du Stepwise (paramètre physique du bassin).....	242
4.5.14 Calcul de L600 par la méthode du Stepwise (paramètre du modèle).....	243
4.6.1 Utilisation du réseau général pour l'élaboration d'une méthode de transposition.....	248
4.6.2 Carte de situation des bassins sélectionnés.....	250
4.6.3 Exemple d'ajustement d'une fonction puissance entre lames écoulées et précipitées.....	251
4.6.4 Exemple de carte pédologique et d'isohyètes pour trois grands bassins du réseau général.....	255
4.6.5 Comparaison des lames calculées et observées.....	263
4.6.6 Calcul des lames écoulées des différents sous-bassins avec les UC des cartes de l'EMBRAPA.....	280
4.6.7 Validation de la méthode : comparaison des lames calculées et observées.....	281
4.6.8 Comparaison de la formule SUDENE/ORSTOM avec la formule d'AGUIAR.....	282

Chapitre 5 : Transposition des caractéristiques des crues

5.1 Relation entre K_x et la surface S du bassin de la zone cristalline	294
5.2 Relation entre la lame écoulée L_e et la surface S des bassins	295
5.3 Temps de base moyen, en fonction de la surface. Bassins des zones cristallines	299
5.4 Temps de montée moyen, en fonction du temps de base moyen. Toutes zones	300
5.5 Temps de base moyen, en fonction du temps de base unitaire. Toutes zones.....	300
5.6 K_x moyen, en fonction de K_x unitaire. Toutes zones	301
5.7 K_x moyen, en fonction de la surface. Bassins des zones sédimentaires.....	302
5.8 Temps de base moyen, en fonction de la surface. Bassins des zones sédimentaires.....	302
5.9 Comparaison du double de la crue décennale estimée à la crue de projet calculée par la formule proposée	308

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Contexte naturel et histoire de l'hydrologie des petits bassins

1.1 Nombre d'appareils installés et information fournie par les différents programmes.....	42
--	----

Chapitre 2 : Techniques hydrologiques utilisées

2.1 Comment résoudre les problèmes hydrologiques des petits bassins	48
2.2 Etapes des études hydrologiques de petits bassins	58
2.3 Dates de publication des différents rapports	75

Chapitre 3 : Description des bassins versants représentatifs du Nordeste brésilien

3.1.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin de TAUA. Méthode de Muntz.....	80
3.1.2 Répartition par sous-bassin des principales formations géologiques, types de sol et de végétation du bassin de TAUA	83
3.1.3 Caractères morphométriques du bassin de TAUA	84
3.1.4 Lame écoulée annuelle du bassin de TAUA (mm)	88
3.1.5 Variabilité des écoulements annuels sur les bassins de TAUA	89
3.1.6 Caractéristiques des crues du bassin de TAUA	90
3.1.7 Lames écoulées caractéristiques (mm) du bassin de TAUA.....	91
3.1.8 Principaux groupes ou types de comportement hydrologique du bassin de TAUA.....	93
3.2.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin de SUME. Méthode de Muntz.....	103
3.2.2 Principales formations géologiques, types de sol et végétation du bassin de SUME.....	106
3.2.3 Caractères morphométriques des trois sous-bassins du bassin de SUME	107
3.2.4 Chronique des lames écoulées du bassin de SUME.....	116
3.2.5 Caractéristiques des crues du bassin de SUME.....	116
3.2.6 Lames écoulées caractéristiques du bassin de SUME.....	117
3.2.7 Evolution des écoulements en fonction du sol et de la couverture végétale du bassin de SUME.....	118
3.3.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin du RIACHO DO NAVIO. Méthode de Muntz.....	123
3.3.2 Principales formations géologiques, types de sol et de végétation. Schéma des liaisons entre sous-sol, sol et végétation du bassin du RIACHO DO NAVIO.....	123
3.3.3 Caractères morphométriques du bassin du RIACHO DO NAVIO	127
3.3.4 Chronique des lames précipitées et écoulées en mm du bassin du RIACHO DO NAVIO	130
3.3.5 Caractéristiques des crues du bassin du RIACHO DO NAVIO	132
3.3.6 Lames écoulées caractéristiques en mm du bassin du RIACHO DO NAVIO	133
3.3.7 Comparaison des lames calculées par le modèle simplifié mensuel et le modèle journalier du bassin du RIACHO DO NAVIO.....	135
3.4.1 Résultats des tests d'infiltration du Bassin de JUATAMA. Méthode de Muntz.....	143
3.4.2 Principales formations géologiques, types de sol et végétation du bassin de JUATAMA	144
3.4.3 Caractères morphométriques du bassin de JUATAMA.....	145
3.4.4 Petits açudes recensés à l'intérieur du bassin de JUATAMA.....	145
3.4.5 Chronique des termes du bilan hydrologique du bassin de JUATAMA	146
3.4.6 Caractéristiques des crues du bassin de JUATAMA	148
3.4.7 Lames écoulées caractéristiques du bassin de JUATAMA.....	149
3.5.1 Résultats des tests d'infiltration du bassin de IBIPEBA. Méthode de Muntz	154
3.5.2 Principales formations géologiques, types de sol et végétation du bassin de IBIPEBA	155
3.5.3 Caractères morphométriques du bassin de IBIPEBA.....	156
3.5.4 Chronique des précipitations et des écoulements sur le bassin de IBIPEBA	159
3.5.5 Caractéristiques des crues du bassin de IBIPEBA	160
3.5.6 Lames écoulées caractéristiques (mm) du bassin de IBIPEBA.....	160
3.5.7 Estimation des pertes sur le réseau hydrographique du bassin de IBIPEBA	162
3.6.1 Perméabilité de différents sols du Nordeste	165

Chapitre 4 : Transposition des écoulements annuels

4.2.1	Valeurs initiales des paramètres des hyperboles de la station de Caldeirão.....	174
4.2.2	BASSIN DE CALDEIRAO à TAUA. Exemple de résumé de l'ajustement du modèle SUDENE-ORSTOM	181
4.2.3	Critères d'ajustement des modèles	185
4.2.4	Validation des modèles.....	186
4.2.5	Paramètres principaux des ajustements et sigles des bassins	189
4.3.2	Répartition des pluviomètres par classe de qualité globale.....	194
4.3.3	Zonage pluviométrique de la zone Sertão	199
4.3.4	Zonage pluviométrique de la zone de Transition	205
4.3.7	Liste des pluviomètres sélectionnés.....	206
4.3.8	Validation du choix des pluviomètres sélectionnés.....	207
4.4.1	Comparaison des coefficients d'abattement proposés par VUILLAUME et NOUVELOT	209
4.4.2	Coefficient R_0 pour différents pluviomètres	211
4.4.3	Coefficient d'abattement R en fonction de la pluie journalière, pour un bassin de 500 km ²	211
4.4.4	Coefficient de correction r à appliquer en fonction de la surface.....	211
4.4.5	Conséquence de l'abattement des pluies sur le calcul des écoulements annuels.....	213
4.5.1	Valeurs de L600 et de A pour les deux grandes zones climatiques.....	215
4.5.2	Typologie des bassins : Analyse en composantes principales.....	221
4.5.3	Régressions entre les "faciès" du régime hydrologique et le module (L(P)), pour les cinq groupes de bassins. Grande zone climatique du Sertão.....	224
4.5.4	Valeurs de X10 pour diverses zones et pluviométries	228
4.5.4	Paramètres physiques et morphologiques des bassins étudiés.....	231
4.5.5	Corrélations entre paramètres physiques, morphologiques et des modèles	233
4.5.6	Première tentative de classification des petits bassins du Nordeste brésilien	245
4.6.1	Principales caractéristiques des bassins sélectionnés : Comparaison des écoulements calculés et observés.....	251
4.6.2	Extrait du fichier MAPEDO.FLV	252
4.6.3	Extrait du fichier UNIMAP.FLV (suite)	253
4.6.4	Nombre d'UC et de TS contenu dans le fichier UNIMAP.FLV	254
4.6.5	Caractéristiques et valeurs de L600 des sous-groupes de sol	259
4.6.6	Explication des écoulements apportée par la pluie et le sol.....	266
4.6.7	Facteur de correction CV.....	272
4.6.8	Facteur de correction (CA) proposé	273
4.6.9	Facteur de correction CL.....	275
4.6.10	Eléments du calcul de L600 des différents sous-bassins	276
4.6.11	Validation de la méthode : comparaison des lames calculées et observées	279
4.6.12	Coefficient de correction U de la formule d'AGUIAR	281
4.6.13	Lames écoulées en fonction de la pluviométrie calculée avec diverses formules	282

Chapitre 5 : Transposition des caractéristiques des crues

5.1	Caractéristiques des crues des bassins versants représentatifs du Nordeste brésilien	292
5.2	Valeurs du temps de concentration en minutes calculées selon diverses hypothèses sur la morphologie du bassin.....	293
5.3	Coefficients K et C de la formule d'AGUIAR de calcul des crues	298
5.4	Validation du débit de la crue de projet des cinq bassins les plus dangereux.....	307
5.5	Comparaison des débits de crues calculés avec les formules d'AGUIAR et SUDENE/ORSTOM.....	309