

TRANSPOSITION DES MODULES ANNUELS DES PETITS BASSINS DU NORDESTE BRÉSILIEN SEMI-ARIDE

É. CADIER¹

RÉSUMÉ

Tout comme en Afrique, l'eau constitue l'une des entraves au développement du continent sud-américain. Dans le Nordeste brésilien semi-aride, le principal problème est constitué par la faiblesse de la ressource en eau et l'irrégularité de sa distribution. L'étude des ressemblances et des différences entre les deux continents, et les techniques hydrologiques utilisées pour obtenir une estimation régionale de ces ressources, constituent un exercice riche en enseignements de toute sorte.

Pour notre exposé, nous prendrons l'exemple de la régionalisation des lames écoulées annuelles en nous appuyant sur les résultats présentés par CADIER (1991), MOLLE (1991a), MOLLE et CADIER (1992) et LARAQUE (1991).

¹ Orstom, Boa Viagem, CP 4010, 50000 Recife, Brésil

LE NORDESTE BRÉSILIEN : UNE ZONE SEMI-ARIDE ORIGINALE

LE MILIEU PHYSIQUE ET CLIMATIQUE

LE CLIMAT ET LES PRÉCIPITATIONS

La partie semi-aride du Nordeste, appelée « polygone des sécheresses » et définie comme étant située sous l'isohyète de 800 mm, couvre une superficie de près d'un million de kilomètres carrés et est peuplée de près de vingt millions d'habitants. 25 % de cette surface reçoit une pluviométrie annuelle inférieure à 600 mm et l'on estime à 2 % seulement la surface située sous l'isohyète de 400 mm.

La présence d'une zone sèche dans cette région très proche de l'équateur, résulte de phénomènes climatiques complexes dont les causes sont encore mal expliquées. Cette complexité provoque une grande irrégularité des précipitations, généralement plus élevées qu'en Afrique. Les coefficients de variation des totaux annuels sont toujours supérieurs à 0,25 et dépassent 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 1 438 mm !

Les années sèches ou humides semblent arriver par « paquets ». Les coefficients d'autocorrélation de Markov sont de l'ordre de 0,30. Les années déficitaires consécutives ont eu trop souvent des conséquences dramatiques. Ainsi, au siècle dernier, la « grande sécheresse » de 1878 provoqua la mort de 500 000 personnes dans l'État du Ceará, c'est-à-dire près de la moitié de sa population !

LE MILIEU PHYSIQUE

Au risque de caricaturer quelque peu une réalité complexe, donnons quelques éléments sur le milieu physique de ce Nordeste brésilien.

Ses formations géologiques peuvent être regroupées en deux ensembles :

- les **régions cristallines**, où l'on retrouve, généralement à plus faible profondeur qu'en Afrique, le socle précambrien imperméable et dépourvu d'aquifère important. On y trouve souvent des sols peu épais : lithosoliques, affleurements rocheux et podzoliques dans la partie haute des toposéquences, puis des bruns eutrophes et des régosols, et enfin les planosols, les solonetz et les vertisols dans les parties basses ;

— les régions sédimentaires, qui sont recouvertes de sols plus épais et perméables tels que des latosols, des cambisols ou des rendzines. Les régions d'origine cristalline couvrent près des deux tiers de la zone semi-aride. En règle générale, les écoulements des zones cristallines sont les plus élevés.

Une orogénèse plus active rend moins fréquentes les zones de faible relief qui sont souvent recouvertes en Afrique par de fortes épaisseurs d'altération. Pour cette raison, les phénomènes de dégradation hydrographique apparaissent moins rapidement quand la taille du bassin augmente. Une autre conséquence de la relative jeunesse des sols peu lessivés de ces régions cristallines est leur richesse chimique élevée, qui se traduit par une plus grande fertilité, mais aussi par des risques de salinisation accrus.

La végétation naturelle est la *caatinga*, végétation arbustive de faible ou moyenne hauteur, dense ou très dense, qui est une sorte de maquis parfois difficilement pénétrable. Cette végétation protège bien le sol et rend les phénomènes de dégradation de la surface du sol ou « effet de surface » beaucoup moins fréquents qu'en Afrique.

LES AÇUDES

Pour essayer de conserver un peu du précieux liquide, les habitants ont construit, lorsque c'était possible, des *açudes*.

Açude est le nom donné aux barrages de toutes tailles dans le Nordeste du Brésil. C'est l'ouvrage hydraulique le plus répandu. On estime qu'il en existe plus de soixante-dix mille. Il s'agit, le plus souvent, de petits barrages de terre qui émaillent le paysage et qui sont trop souvent dimensionnés et construits de façon totalement empirique. Leur potentiel est mal utilisé. La principale finalité pratique des études hydrologiques des petits bassins des zones sèches est de fournir les données de base nécessaires au dimensionnement et à la gestion de ces petits barrages.

La figure 1 montre l'incroyable densité des petits *açudes*. Dans certaines régions, le volume total de l'eau emmagasinée est de l'ordre de l'écoulement moyen annuel et les densités sont proches d'un *açude* par kilomètre carré. Ces retenues influeront, bien évidemment, sur les régimes hydrologiques.

INFORMATION HYDROLOGIQUE DISPONIBLE

LES ÉTUDES SUR PETITS BASSINS

Les premières études spécifiques relatives aux petits bassins débutèrent en 1963. Dix ensembles de bassins représentatifs furent finalement installés, totalisant 47 stations limnigraphiques, 61 limnimétriques, avec un total général de 4 084 stations x années de mesure, tous appareils confondus.

La planification de l'installation de ces bassins a été réalisée à l'aide d'un découpage du Nordeste en zones hydrologiques homogènes (DUBREUIL, 1965 ; NOUVELOT, 1974). A partir de 1980, un certain nombre de petits bassins, appelés « bassins expérimentaux », ont été installés pour mesurer l'influence des variations des caractéristiques des sols et de la végétation sur l'écoulement.

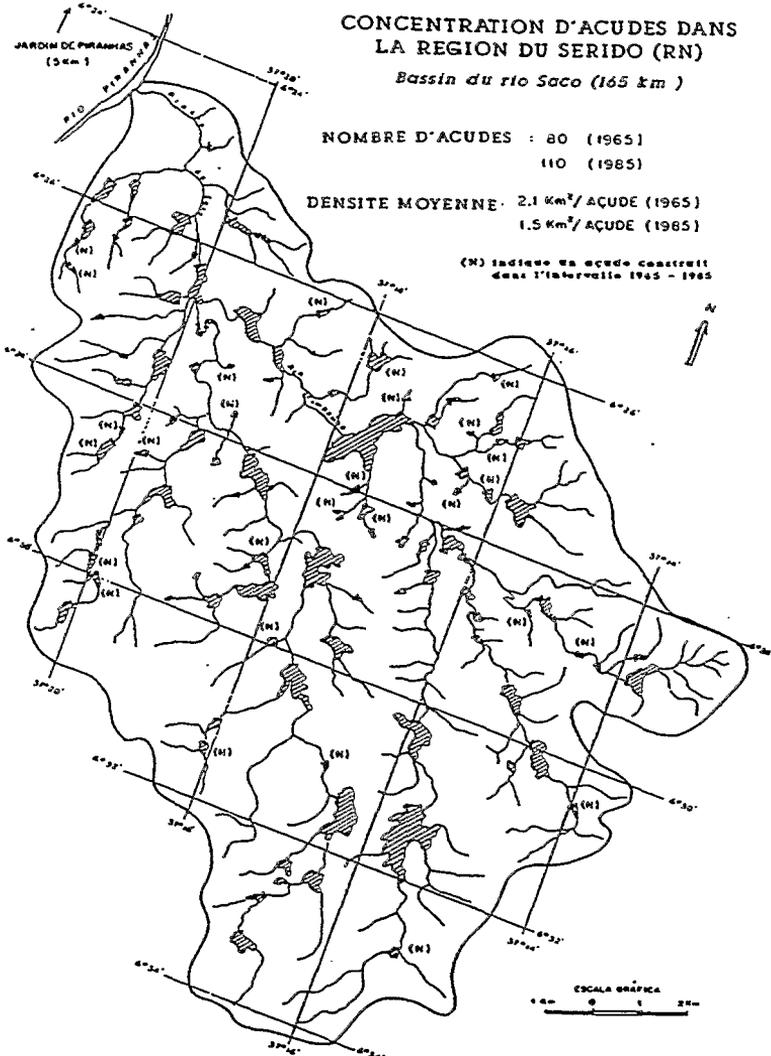


Figure 1
Densité d'acudes dans la région de Caico (MOLLE, 1991a)

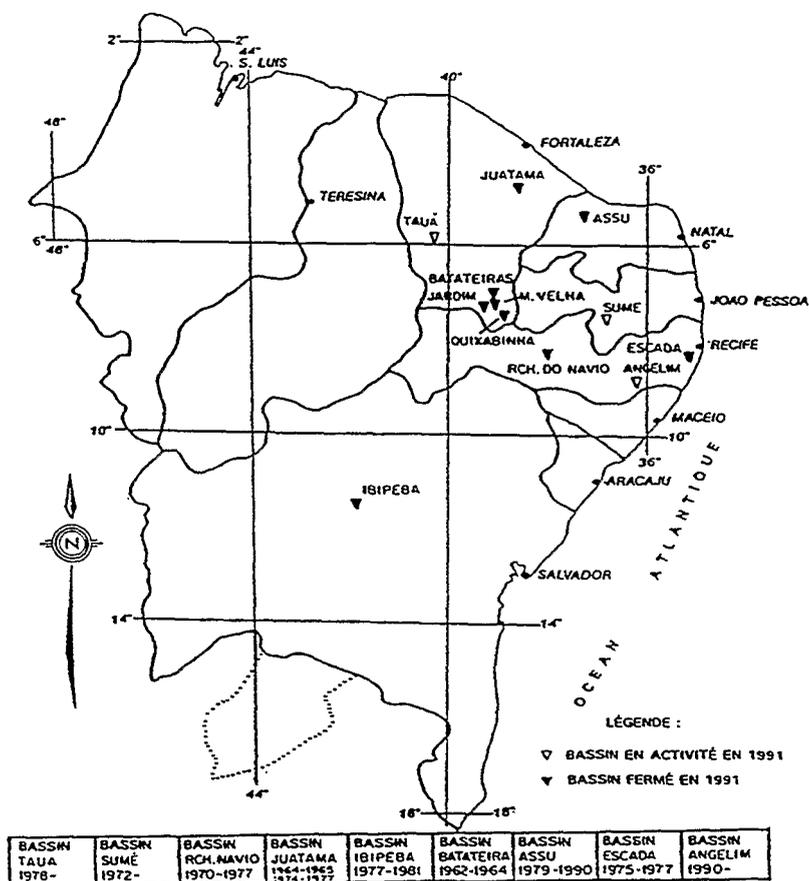


Figure 2

Carte de situation des bassins représentatifs du Nordeste brésilien

En fin de compte, seuls 42 petits bassins ont présenté des résultats de qualité suffisante pour être intégrés à l'étude de synthèse finale (figure 2). Cela représente un nombre bien inférieur (la moitié ou le quart) aux chiffres équivalents pour l'Afrique. Démarrée dix ans plus tard, l'implantation des bassins s'est effectuée dans le Nordeste de manière plus rapide et plus homogène. Les bassins ont été conçus pour étudier les écoulements annuels de manière prioritaire par rapport aux caractéristiques des crues.

L'INFORMATION FOURNIE PAR LE RÉSEAU GÉNÉRAL

Le réseau général de mesure hydropluviométrique de tout le Nordeste (semi-aride ou non semi-aride) comprend environ 2 500 pluviomètres, 250 pluviographes et 200 stations hydrométriques. Un nombre relativement important de ces appareils comporte plus de 60 années de mesure. Nous utiliserons cette information pour compléter celle acquise directement sur les petits bassins.

Une couverture topographique au 1/100 000 et une couverture pédologique à plus petite échelle, variant entre le 1/400 000 et le 1/1 000 000, existent dans la partie du Nordeste qui nous intéresse.

TYPLOGIE HYDROLOGIQUE DES PETITS BASSINS

RELATION ENTRE PLUVIOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT ANNUEL MOYEN

Une modélisation systématique des relations entre la pluie et le débit des 42 bassins déjà cités, alliée à une sélection rigoureuse des pluviomètres devant servir d'entrée à ces modèles, ont permis d'établir une formulation inédite simple, à trois paramètres, qui peut s'écrire :

$$L(P) = C L_{600} e^{A(P-600)}$$

- C est un facteur de correction climatique, C vaut 1 pour la zone Sertão ;
- L_{600} correspond à l'écoulement moyen annuel dans la grande zone climatique Sertão pour une précipitation annuelle moyenne de 600 mm ;
- A est la pente de la droite de $\text{Log}(\text{écoulement}) = f(\text{pluviométrie})$ de la figure 3.

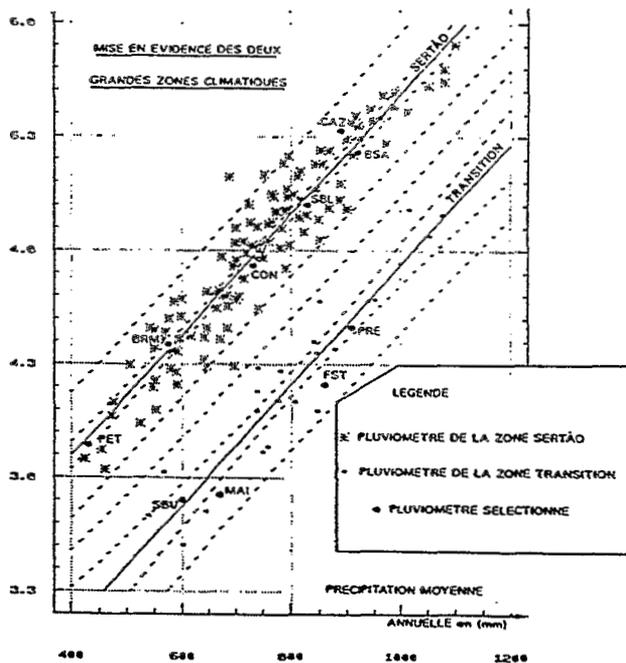


Figure 3

Mise en évidence de la relation entre la pluviométrie annuelle moyenne et l'écoulement annuel moyen pour les deux grandes zones climatiques

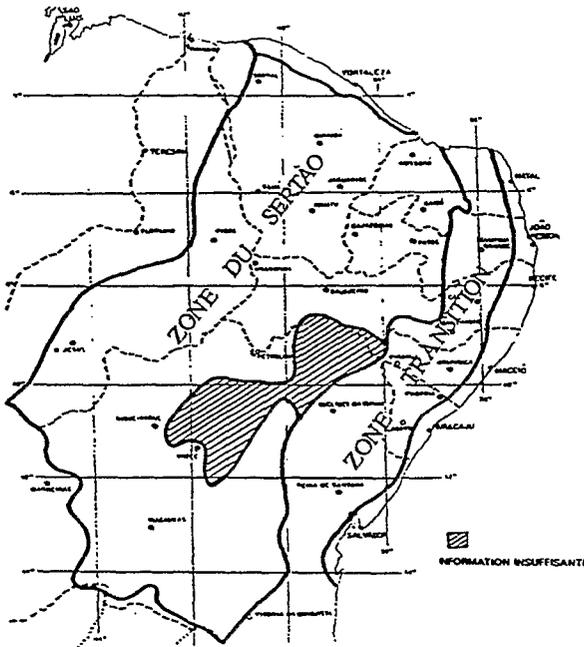


Figure 4
Grandes zones pluviométriques

Cette formule introduit les deux coefficients, L_{600} et A , qui serviront de base à la typologie des bassins.

REGROUPEMENT DES BASSINS PAR RAPPORT À LEUR FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES VALEURS RELATIVES DES « FACIÈS » DES RÉGIMES

Nous analyserons tout d'abord ce que nous avons appelé « faciès » du régime hydrologique :

- la distribution des écoulements annuels :
- lame décennale humide LA01 ;

La figure 5 montre les principaux résultats d'une ACP effectuée avec toutes les variables « relatives » mentionnées ci-dessus, en utilisant les 42 bassins :

- 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**.

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 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 ;
- à l'opposé, le **groupe 4** que nous pouvons qualifier de faible et irrégulier, est composé de bassins qui présentent 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 faibles fréquences 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 Caldeirão (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 ;

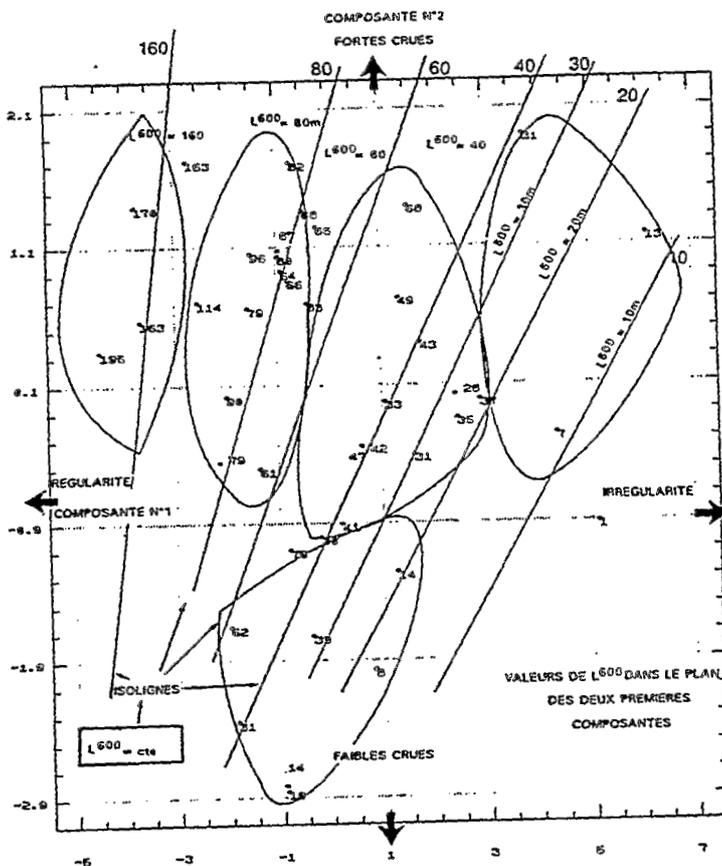


Figure 6

Typologie des bassins : régularité et abondance

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DU RÔLE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

Une analyse en composantes principales des mêmes bassins, effectuée cette fois par rapport aux caractères physiques et morphologiques du même échantillon de 42 bassins, respecte les regroupements réalisés à partir des « faciès ». Nous montrons ainsi la validité, la cohérence et l'unicité de ces deux typologies (figure 7).

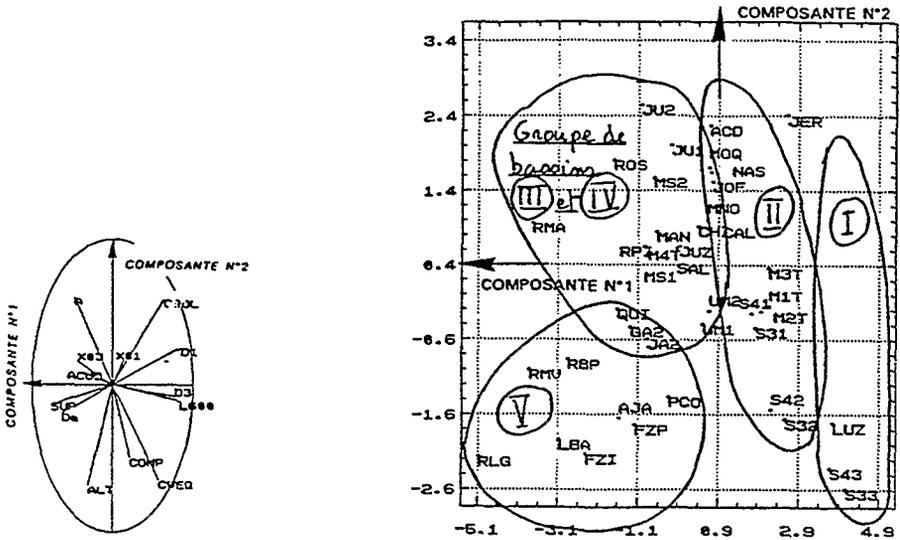


Figure 7

Analyse en composantes principales du rôle des paramètres physiques

— le groupe 5 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.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES VALEURS ABSOLUES DES RÉGIMES : RÉGULARITÉ ET ABONDANCE VONT DE PAIR

Nous avons reporté les valeurs de L_{600} de tous les bassins sur la figure 6. Or, cette figure a été établie dans le système d'axes des variables relatives. Il est intéressant de noter que les L_{600} qui n'ont pas servi à construire ce graphique s'ordonnent parfaitement par rapport à l'axe de régularité.

PREMIER ESSAI D'ESTIMATION DES LAMES ÉCOULÉES ANNUELLES

Le module ou la lame écoulee annuelle moyenne peut donc s'exprimer en fonction des coefficients L_{600} et A qui caractérisent le bassin, ainsi que de la pluviométrie P et de la zone climatique.

Nous avons recherché les relations existant entre ces coefficients et les paramètres caractérisant les aspects physiques et morphologiques des bassins versants.

PARAMÈTRES PHYSIQUES ÉTUDIÉS

Pour chaque bassin, nous avons analysé l'influence des paramètres suivants :

- la surface du bassin versant (SUP) ;
- la proportion du bassin contrôlée par des *açudes* (ACUD) ;
- l'indice de compacité du bassin (COMP) calculée avec la formule de Gravelius ;
- la dénivelée spécifique du bassin (Ds) ;
- l'altitude moyenne du bassin (ALT) ;
- la densité de drainage (DREN) ;
- 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 du bassin sédimentaire 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 bassins de Taua ont été rangés dans cette classe ;
 - les *classes 3 et 4* sont composées de bassins dont les sols sont intermédiaires ou sont des juxtapositions des sols de classes 2 et 5 ;
- 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 ;
 - *classe 2* : bassin assez bien conservé, avec quelques zones de mise en culture ;
 - *classe 3* : les dégradations de la végétation commencent à être importantes où 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 ;
 - *classe 7* : dégradation encore plus avancée de la surface du sol, décapage des premiers horizons.

Explication du L₆₀₀ par CSOL et CVEG
Méthode du STEPWISE

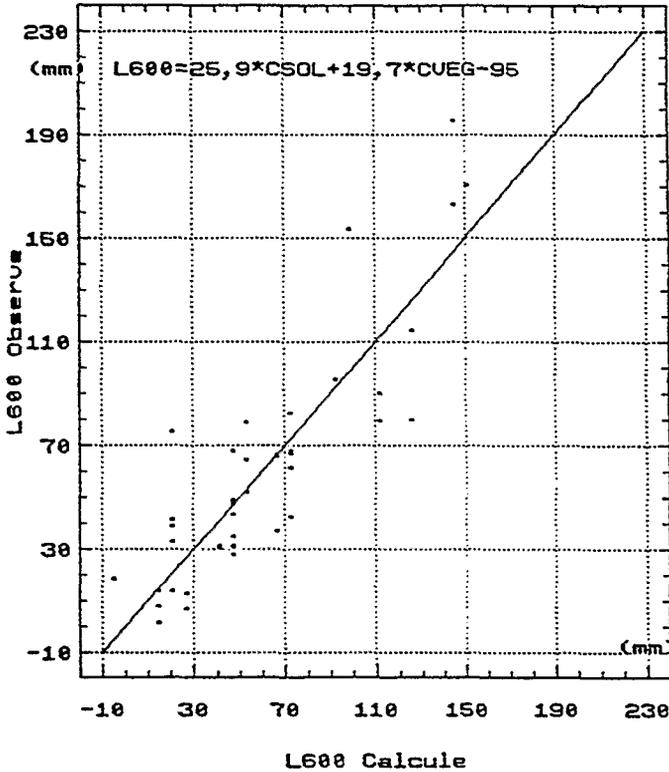


Figure 8
Calcul de L₆₀₀ par la méthode du stepwise

FORMULES PROPOSÉES POUR LE CALCUL DE L₆₀₀

Une analyse multivariée (ACP, corrélations multiples et *stepwise*) de l'influence de ces différents paramètres sur les coefficients L₆₀₀ conduit à identifier 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 représentée sur la figure 8 :

$$L_{600} = 25,9 \text{ CSOL} + 19,7 \text{ CVEG} - 95 \text{ mm}$$

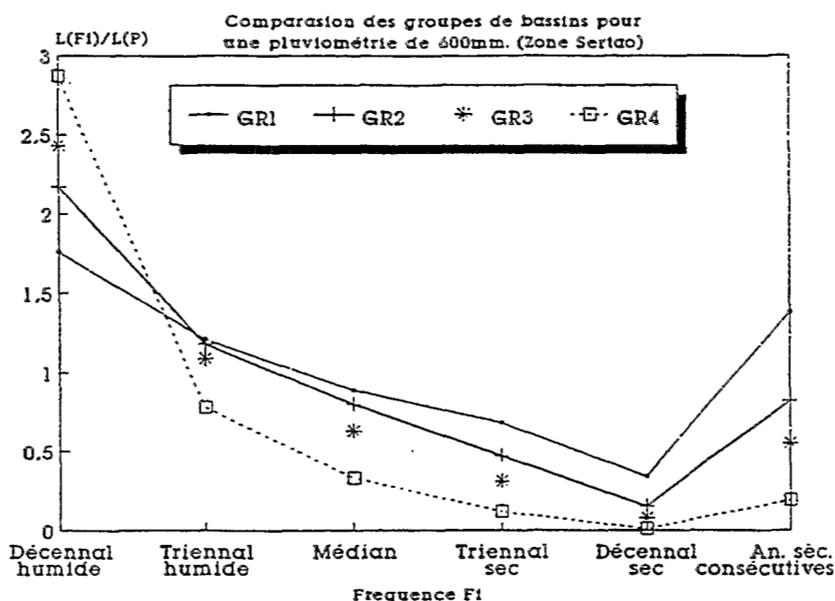


Figure 9
Calcul de lames écoulées annuelles de diverses fréquences

ESTIMATION DE LAMES ANNUELLES DE DIFFÉRENTES FRÉQUENCES

L'abaque de la figure 9 permet de calculer les lames annuelles de diverses fréquences en fonction du module, pour les cinq groupes de bassins définis au paragraphe « Analyse en composantes principales des valeurs relatives des faciès des régimes » (p. 315). Cet abaque est valable pour une pluviométrie annuelle de 600 mm, dans la zone climatique du Sertão.

Deux abaques analogues permettent de réaliser ce calcul pour des pluviométries de 400 et 800 mm, ainsi que pour la zone climatique de transition.

MÉTHODE DE TRANSPPOSITION FINALEMENT PROPOSÉE

L'explication des L_{600} des bassins étudiés par les paramètres *CSOL* et *CVEG*, en utilisant l'équation proposée au paragraphe précédent, est simple, cohérente et satisfaisante.

Un problème majeur se posera cependant à l'utilisateur désireux d'appliquer cette formule sur des bassins inconnus. En effet, les coefficients *CSOL* et *CVEG* ont été déterminés sur des bassins qui ont fait l'objet d'études pédologiques

spécifiques longues à mettre en œuvre. 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.

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 ?

Pour permettre son utilisation, nous avons donc dû élaborer une autre méthode d'évaluation des lames annuelles. Cette méthode utilise principalement l'information pédologique des cartes de sols de l'Embrapa. Cette information est moins « pointue » que celle dont nous disposions sur nos bassins versants, mais elle a le mérite d'exister dans tout le Nordeste. Nous nous limiterons à présenter ici quelques éléments de la méthode proposée, sans aborder les problèmes de son élaboration et de sa validation qui ont été décrites par CADIER (1991).

CLASSIFICATION HYDRO-PÉDOLOGIQUE DU BASSIN : DÉTERMINATION 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 de Cartographie 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 calculent une moyenne pondérée des L_{600} par sa surface. Dans le cas des *UC*, utiliser le tableau B pour appliquer la formule suivante :

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 TS de toutes les cartes pédologiques de l'Embrapa.

Tableau A (version résumée)
Aptitude à l'écoulement des principaux sols du Nordeste semi-aride

TYPE DE SOL (TS) Nom	Caractéristiques additionnelles Semi-aride	L600 (mm)	% DU NE brut (mm)
Brun non calcique	*	37	25,5 %
et lithosolique	vertique	25	3,2
Affleurement de roche		90	3,3
Podzolique de texture sableuse à moyenne		15	5,7
Moyenne/argileuse ou moyenne/plinthique		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 le 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 ;

$$L_{600} \text{ brut du bassin} = L_{600}(UC1) * S(UC1)/S \text{ (pour la première UC)} + \\ L_{600}(UC2) * S(UC2)/S \text{ (pour la deuxième UC)} \\ + \text{ etc. (pour les UC suivantes).}$$

Dans le cas des *TS*, utiliser le tableau A pour appliquer une formule du même type :

$$L_{600} \text{ brut du bassin} = L_{600}(TS1) * S(TS1)/S + L_{600}(TS2) * S(TS2)/S + \text{ etc.}$$

$S(UC1)$, $S(TS1)$, etc., sont les surfaces des différents *UC* ou *TS* qui se trouvent dans le bassin ; S correspond à la surface totale du bassin.

— **épaisseur** : les sols peu épais, érodés ou tronqués, coulent davantage 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 plinthisques 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.

Le tableau A permet une évaluation globale de l'importance relative des différentes catégories de sols 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 solodosiques. 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 ;

— **les 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 solodosiques ;

— 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)
Valeurs en mm des L_{600} brut des UC de l'État du Pernambuco

UC	L600	UC	L600	UC	L600	UC	L600	UC	L600	UC	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

CORRECTIONS DE L_{600}

La valeur finale ou corrigée de L_{600} est calculée par la formule :

$$L600 \text{ corrigée} = L600 \text{ brut} \times CV * CA * CL$$

Où :

— CV est le facteur correctif de végétation ;

- *CA* est le facteur correctif de présence d'açudes 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.

INFLUENCE DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE (FACTEUR CV)

Les valeurs de L_{600} brut correspondent à des situations moyennes de la couverture végétale actuelle du Nordeste. Ces conditions sont, en fait, intermédiaires entre une couverture vierge et un déboisement total.

Valeurs du facteur de correction CV

Etat de la couverture végétale	Extrêmement bien conservée	Bien conservée	Occupation normale	Très dégradée	Extrêmement dégradée
L600 compris entre 20 et 50 mm	0,5	0,75	1	1,5	2
L600 inférieur à 20 ou supérieur 50 mm	(0,75)	(0,9)	1	(1,25)	(1,5)

PRÉSENCE D'AÇUDES EN AMONT DU SITE DE LA RETENUE (FACTEUR CA)

Valeurs du facteur de correction CA

Densité d'Açudes	Très forte : supérieure à , ac/km ² ou présence de très grands açudes*	Normale**	Nulle
Sa/S*** 0	> 0,50	entre 0,30 et 0,50	
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 ou densité entre 0,25 et 0,5 açude par km².

PRÉSENCE DE DÉPRESSIONS ET DE ZONES DE RÉTENTION DE L'ÉCOULEMENT (FACTEUR CL)

Non décrit ici, *CL* peut varier entre 0,8 et 1,2 (CADIER, 1991-MOLLE et CADIER, 1992).

CALCUL DE LA LAME ÉCOULÉE 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 un abaque non présenté ou la formule suivante :

$$L(P(i)) = L_{600}(i) \text{ corrigée} * C * eA(P(i) - 600)$$

Les tableaux fournissent les valeurs des coefficients A et C en fonction du type de sol, du bassin et de la zone climatique. Le coefficient A vaut normalement 0,0033 et C vaut 1 dans la zone Sertão.

CONCLUSION

La méthode de transposition hydrologique que nous avons présentée est en fait un peu plus complexe que les quelques pages de notre présentation le laissent entendre. Devant répondre à une demande urgente du développement, nous avons travaillé sur deux niveaux différents :

- un premier niveau, qui permet à l'aménageur de résoudre rapidement la plus grande partie des problèmes liés à l'estimation de la ressource en eau, avec, bien sûr, une précision inversement proportionnelle à la simplicité de la méthode, conçue pour être utilisée par des techniciens non spécialisés en hydrologie ou en pédologie ;
- un deuxième niveau, réservé aux spécialistes, aux chercheurs et/ou aux cas délicats. Ce deuxième niveau nécessite une connaissance beaucoup plus complète de l'ensemble des mécanismes et c'est son application qui permettra d'améliorer l'ensemble de la méthode.

Plusieurs autres études originales ont été réalisées ces dernières années, toujours dans le but de mieux comprendre et d'améliorer la construction et la gestion des petits aménagements hydrauliques de cette zone semi-aride du Nordeste brésilien. Citons-en les principales :

- méthode de transposition des débits de la crue de projet des petits bassins (CADIER, 1991) ;
- étude de la forme des retenues (MOLLE, 1992), de leur évaporation et infiltration (MOLLE, 1989) ;

- étude des mécanismes de reconcentration des sels par évaporation dans les retenues (LARAQUE, 1991) ;
- une étude historique des raisons de la construction et des modes de fonctionnement des açudes dans le Nordeste (MOLLE, 1991b) ;
- étude de synthèse des caractéristiques et potentialités des açudes dans le Nordeste (MOLLE, 1991a) ;
- un manuel du petit açude de 520 pages destiné aux aménageurs et aux hommes de terrain (MOLLE et CADIER, 1992) ;
- plusieurs programmes de simulation conçus pour faciliter le dimensionnement et la gestion des petites retenues, dont le système POMAC, qui nous a permis, par exemple, de proposer les normes de dimensionnement des barrages en fonction des modules, de leur forme et de leur utilisation ;
- plusieurs autres études hydrologiques de base relatives à la constitution de banques de données (JACCON et SÉCHET, 1980), à l'étude des sécheresses (MOLINIER et CADIER, 1984-1985) ou aux mécanismes hydrologiques sur petits bassins (MOLINIER *et al.*, 1989).

Il semble clair que tout le parti que peut offrir leur comparaison avec les études analogues réalisées en Afrique n'a pas encore été tiré.

BIBLIOGRAPHIE

- BRET B., 1989 - Les hommes face aux sécheresses - Nordeste brésilien, Sahel africain. IHEAL & EST - Samuel Tastet Éd. Mayenne, 422 p.
- CADIER E., 1984 - Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do semi-árido. Recife, Sudene-DRN-HME, 75 p. ill. (Brasil, Sudene, Hidrologia, 21). Convênio Sudene/Orstom.
- CADIER E., 1991 - Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien, thèse de doctorat USTL, Montpellier, 396 p.
- CADIER E., ALBUQUERQUE C.H.C. de., ARAUJO 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 ..., vol.1, 202-225.

- CADIER E., DUBREUIL P., 1986 - Influence de la taille et du nombre de retenues sur le régime hydrologique de petits bassins du Nordeste du Brésil. XIX^e Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris.
- CADIER E., MOLLE F., ALBUQUERQUE C.H.C. de., DOHERTY F.R., MONTGAILLARD M., 1990 - Dimensionnement de petits barrages dans le Nordeste brésilien semi-aride. Journées hydrologiques de Montpellier, 30 p.
- CAMPELLO S., 1979 - Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Brésil). Paris, Orstom, 121 p. ill. 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, vol.1, 25-38. DNAEE (Departamento Nacional de aguas e Energia Eléctrica), 1984 - Mapa de disponibilidade hídrica do Brasil, Recife.
- DOHERTY F.R.O., CADIER E., FRASSINETTE P.F.A., 1992 - Modélisation hydrologique des petits bassins du Nordeste brésilien. Sudene/Orstom, 200 p. (en cours de publication).
- DUBREUIL P., 1965 - Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, n° 2.
- DUBREUIL P., 1966 - Un exemple d'estimation sur carte du volume total emmagasiné dans les petits réservoirs d'une région. In Symposium de Garda AISH. Hydrologie des lacs et des réservoirs, 70 p. Garda, AISH, vol. 2, 551-59.
- DUBREUIL P., GIRARD G., HERBAUD J.M., 1968 - Monographie hydrologique du bassin du Jaguaribe (Ceará-Brésil). Orstom, Paris, 385 p.
- DUBREUIL P., MORELL M., SÉCHET P., 1975 - Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. 12, n° 1, 13-36.

- DUBREUIL P., VUILLAUME G., 1975 - Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. *In Symposium de Tokyo. Publication de l'AISH*, n° 117, 205-15.
- Embrapa, 1992 - En préparation : Zonage du Nordeste du Brésil.
- 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., 1975 - Modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. 12, n° 3, 189-221.
- GOMES H. P., SRINIVASAN V. S., CADIER E., GALVAO 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, 322-337.
- GUSMÃO DA SILVA A.C., JACCON G., SÉCHET P., 1979 - Banco de dados hidroclimatológicos do Nordeste. Recife, Sudene-DRN, Convênio Sudene/Orstom, 15 p.
- HASTENRATH S., 1990 - Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *J. Clim.*, 3, 8, 893-904.
- HIEZ G., 1977 - L'homogénéité des données pluviométriques. *In Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. 14, n° 2, 129-172.
- HISARD P., 1990 - Variabilité des précipitations dans l'Atlantique tropical sud-est pendant un El Niño. Orstom, *Hydrologie Continentale*, vol. 5, n° 2, 87-104.
- 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, Série Hydrologie*, vol. 20, n° 1, 3-46.

- JACCON G., SÉCHET P., 1980 - Base de données hydrologiques du nord-est brésilien. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. 17, n° 3/4, 177-219.
- KOUSKY V.E., 1985 - Atmospheric circulation changes associated with rainfall anomalies over tropical Brazil. *Mon. Weath. Rev.*, 113, 11, 1951-1957.
- LARAQUE A., 1991 - Comportements hydrochimiques des « açudes » du Nordeste brésilien semi-aride. Évolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, 324 + annexes.
- LEPRUN J.C., 1984/1985 - La conservation et la gestion des sols dans le Nordeste brésilien. Particularités, bilan et perspectives. *Cah. Orstom, Série Pédologie*, vol. 21, n° 4, 257-284.
- MOLINIER M., AUDRY P., DESCONNETS J.C., LEPRUN J.C., 1989 - ATP-PIREN : Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. Rapport final - Orstom Recife, Brésil. 25 p. + annexes.
- MOLINIER M., CADIER E., 1984/1985 - Les sécheresses du Nordeste brésilien. In *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. XXI (4), 1984/1985, 23-49.
- MOLLE F., 1989 - 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 - Caractéristiques et potentialités des « açudes » du Nordeste brésilien, thèse de doctorat, USTL, Montpellier, 381 p.
- MOLLE F., 1991b - Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento. *Col. Mossoroense, Série C*, vol. 653, 171 p.
- MOLLE F., 1992 - Geometria dos pequenos açudes. Recife. Sudene-PRN, 126 (Brasil, Sudene, Hidrologia, 29 p.), « Convênio Sudene/Orstom ».
- MOLLE F., CADIER E., 1992 - Manual do pequeno açude. Sudene, Coopération Française, Orstom, ill. 521 p.

- NOUVELOT J.F., 1974 - Planificação da implantação de bacias representativas. Aplicação à área da Sudene. Recife, Sudene-DRN, 91 p. Bibliografia original : Planification de l'implantation de bassins versants représentatifs. « Convênio Sudene/Orstom ».
- RODIER J.A., 1976 - Évaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol.13, n° 4, 269-306.
- RODIER J.A., 1982 - La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, Vol. XIX, n°2, 115-127, Paris.
- 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.
- TOEBES C., OURYVAEV V., 1970 - Les bassins représentatifs et expérimentaux. Guide International des pratiques en matière de recherche. UNESCO, Études et rapports d'hydrologie n° 4, 380 p.
- 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 de Fortaleza, vol. 1, 39-66.