

Le comportement des bassins versants représentatifs du Nordeste Brésilien bilan de la collaboration entre hydrologues et pédologues

E. CADIER

Mission Orstom, Apartado 1711-6596, Quito, Equateur

J. C. LEPRUN

Centre du Géochimie de la Surface, 1 rue Blessig, F-67084 Strasbourg Cedex, France

J. F. NOUVELOT

Centre Orstom, BP 5042, F-34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé Dans l'esprit des promoteurs du programme d'étude de bassins versants représentatifs dans le Nord-est du Brésil, dont les premiers appareils ont été installés en 1963, et qui a redémarré en 1973, il s'agissait d'appliquer sur un nouveau continent la technique d'étude de petits bassins mise au point, de manière empirique au cours des 15 années précédentes par Jean Rodier et le service hydrologique de l'Orstom qu'il dirigeait. Grâce à l'impulsion donnée par Dubreuil, un zonage général a été d'abord effectué, suivi d'un plan d'installation pour rationaliser le choix des bassins où furent, bien entendu appliqués les techniques et tout le savoir-faire hydrologique acquis petit à petit sur les bassins d'Afrique. Par la suite, la participation des pédologues a été essentielle pour la compréhension des mécanismes sur les parcelles et bassins expérimentaux et pour la mise au point d'une méthode de transposition hydrologique dont le facteur sol constituait l'un des piliers.

The behaviour of representative watersheds in the northeast part of Brazil

Abstract As far as the promoters of the study programme of representative basins in the northeast part of Brazil are concerned, where the first equipment was installed in 1963 and which took off again in 1973, it was a matter of implementing systematically, in a new continent, the type of small basin study which had been set up empirically during the previous 15 years by Jean Rodier and the Orstom Hydrological Department which he led. Thus began, under the leadership of Pierre Dubreuil, the general regional mapping of the area followed by an installation plan in order to rationalize the choice of basins. Then, the techniques and all the hydrological know-how acquired gradually in the African basins was applied. The participation of pedologists has been essential for understanding the mechanisms on plots and experimental basins and for establishing the methods for hydrological transfer where knowledge of the soils provided an important basis.

LE NORDESTE BRÉSILIEN

Le Nordeste du Brésil couvre un peu moins de 1 600 000 km² avec des précipitations moyennes annuelles qui passent de plus de 2000 mm sur le littoral, à moins de 400 mm à l'intérieur. Délimité grossièrement par l'isohyète 800 mm, le polygone des sécheresses ou Sertão occupe un peu plus de la moitié de la région Nordeste. Sur le flanc ouest, le passage à la région amazonienne se fait très progressivement. En revanche, à l'est, une zone intermédiaire, appelée Agreste, assure une transition, souvent rapide, vers une zone humide appelée zona da Mata. A cette distribution complexe se superpose une irrégularité de la pluviométrie annuelle anormalement forte pour ces latitudes.

Complexe dans le détail, le sous-sol du Nordeste est composé de deux grands types de formations. Les premières, sédimentaires (grès, calcaires), sont couvertes de sols profonds et perméables. Les secondes, issues du socle cristallin précambrien (granites, migmatites, schistes), qui constituent les trois-quarts du Nordeste sec, développent généralement des sols moins épais et peu perméables. Le socle précambrien a continuellement été soumis à une surrection lente, contrairement à son homologue africain qui, lui, est resté tectoniquement stable.

Les altitudes sont relativement faibles puisque plus des 2/3 de la région sont situés au-dessous de 500 m et plus de 90% au-dessous de 800 m. Si le modelé des formations sédimentaires est très plat, celui développé sur le socle cristallin est constitué de versants convexes courts et pentus. Alors que 43% de la superficie comporte des pentes inférieures à 5%, 37% sont occupés par des pentes variant entre 5 et 12% et 20% par des pentes supérieures à 12% (Leprun, 1983).

Dans les zones humides, la forêt naturelle a été presque entièrement remplacée par la monoculture de la canne à sucre ou par des formations végétales secondaires dégradées. Dans l'Agreste, la forêt a cédé la place à quelques cultures fruitières et maraîchères, mais surtout à des zones d'élevage. Enfin, dans le Sertão, la végétation originelle, la *caatinga*, arborée et arbustive, est essentiellement constituée d'espèces xérophiles et épineuses. Dense et peu dégradée, elle est surtout le domaine des *vaqueiros* et de l'élevage extensif. Les zones cultivées sont l'exception et représentent, aujourd'hui, moins de 5% de la superficie totale.

L'eau, entrave majeure au développement de cette région

L'eau a toujours été l'une des entraves au développement des zones sèches du Nordeste brésilien, le problème pouvant parfois atteindre une dimension dramatique. Ainsi, 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 (Molinier & Cadier, 1984-1985). Le problème est constitué autant par la faiblesse des ressources hydriques que par l'irrégularité de leur distribution.

De nos jours, comme la sécheresse des années 1992-1993 l'a prouvé, et cela malgré une importante intervention de l'État, une forte sécheresse continue à provoquer des pertes intolérables en vies humaines, en cultures et en bétail, plongeant dans la misère et le désarroi les quelques 20 millions de ruraux de cette région. Leur unique issue est trop souvent l'exode vers les quartiers pauvres des grandes villes côtières qui aggrave encore davantage les problèmes de ces mégapoles (Leprun *et al.*, 1995).

Les solutions dans les zones arides: les açudes, les puits, le choix d'espèces animales et végétales adaptées

Pour tenter de conserver un peu du précieux liquide, les habitants ont, chaque fois qu'ils l'ont pu, construit des petits barrages appelés açudes. Dans les zones dont le sous-sol est imperméable, ces açudes sont maintenant très nombreux, puisque leur nombre est estimé à plus de 70 000. Leur densité est très élevée, proche des records mondiaux observés dans certaines parties de l'Inde (Molle, 1991).

Dans les zones sédimentaires ou dans les fractures des zones cristallines, la solution a été la perforation et l'exploitation de puits. Les puits traditionnels, de faible profondeur, de grand diamètre, souvent revêtu de briques, appelé poços amazonas, que l'on creuse dans les plaines alluviales, côtoient les forages profonds modernes.

L'ETUDE HYDROLOGIQUE DU VAL DU JAGUARIBE: PREMIÈRES ARMES DES HYDROLOGUES ET PEDOLOGUES AU BRÉSIL (1962-1965)

La coopération de l'Orstom en hydrologie dans le Nordeste du Brésil existe depuis plus de 30 ans (Leprun, 1994). En 1962, dans le cadre d'un projet de Coopération dirigé par la SCET-COOP, était créé le « Groupe d'Etudes du Val du Jaguaribe » ou GEVJ, dont le but était d'impulser le développement du bassin de ce fleuve intermittent de 80 000 km² (Dubreuil *et al.*, 1968). Ce projet a été le premier projet d'envergure réalisé dans le domaine des ressources en eau par la coopération franco-brésilienne. L'expertise française a été reconnue. Des liens se sont tissés qui ne se sont jamais rompus depuis.

Pour la première fois, une équipe d'hydrologues, dirigée par Dubreuil et de pédologues, dirigée par Colmet-Daage, vont travailler ensemble au Brésil, mais chacune de son côté, avec pour seul objectif commun, celui de dresser un inventaire le plus exhaustif possible des ressources naturelles disponibles. C'est ainsi que l'équipe pédologique franco-brésilienne devait réaliser une cartographie au 1/250 000 en 13 feuilles destinée prioritairement à la mise en valeur agronomique (Guichard, 1970). Les hydrologues, de leur côté, réaliseront une importante monographie des ressources en eau de la région (Dubreuil *et al.*, 1968). Des cartes géologiques, morphologiques et de végétation furent également produites par interprétation des photographies aériennes. Il s'agissait donc, comme à la même époque en Afrique, d'inventaires longs et systématiques et non d'études de processus et de fonctionnement. Pour répondre au défi posé par l'importance de l'étude, la nouveauté du sujet et la brièveté des délais, ces hydrologues ont su brûler les étapes, adaptant judicieusement l'expérience acquise depuis dix ans en Afrique en mettant en oeuvre trois méthodologies interdépendantes:

- (a) collecter, critiquer, valider les données anciennes;
- (b) étalonner en trois saisons des pluies (heureusement abondantes) les stations hydrométriques du réseau général jugées intéressantes; et
- (c) appréhender les modalités de la formation des écoulements sur divers bassins versants représentatifs (BVR) de régions hydrologiques homogènes installés entre 1962 et 1964.

L'implantation de cinq BVR par le GEVJ avait pour objectif principal de mieux connaître la contribution des deux grandes provinces géologiques (cristalline et

sédimentaire) aux ressources en eau des grands bassins. L'installation de nouvelles stations hydrométriques sur le réseau général n'aurait sans doute pas pu répondre à cette question en deux ou trois ans. La connaissance des mécanismes hydrologiques des petits bassins n'aura été qu'un sous-produit de cet objectif.

Des cartes pédologiques pour l'ensemble des BVR furent élaborées, mais on se rendit compte que les critères de classification des sols alors utilisés à l'Orstom ne permettaient pas d'expliquer de manière pertinente les régimes et mécanismes hydrologiques. La collaboration entre hydrologues et pédologues attendra encore une vingtaine d'années pour se concrétiser. Entre temps, la synthèse de tous les BRE étudiés par l'Orstom fut entreprise, en commençant par le recueil de leurs données (Dubreuil *et al.*, 1972) et par la planification de ces études dans le Nordeste à partir de 1973.

L'ETUDE DES BASSINS REPRESENTATIFS DE L'ENSEMBLE DU NORDESTE: LA COLLABORATION AVEC LA SUDENE (1973-1992)

Historique et articulation des différents programmes d'études de petits bassins

En 1973, la Surintendance pour le Développement du Nordeste (Sudene) demandait à l'Orstom de réaliser des études analogues à celle du GEVJ sur l'ensemble du Nordeste, soit 1,6 millions de km². Ceci impliquait la création d'une banque de données moderne pour regrouper les informations en provenance des 2 ou 3 milliers de stations du réseau hydrométéorologique de base, l'analyse et la cartographie de ces données, ainsi que l'installation d'un ensemble de bassins versants représentatifs conçu pour donner une image du régime hydrologique des petits bassins de l'ensemble du Nordeste. On peut regrouper les études menées dans le domaine de l'hydrologie des petits bassins pendant ces 19 ans selon quatre thèmes:

(a) Planification, installation et exploitation d'un réseau de bassins représentatifs (BVR) en routine (1974-1990) Ce lourd programme d'étude des régimes hydrologiques d'un ensemble de petits bassins représentatifs, aura duré plus de 15 ans, mobilisé une équipe de 10 à 20 personnes et aura servi de base à toutes les autres études. Il a démarré par une planification (Nouvelot, 1974) qui a permis d'identifier les principaux types de bassins et débouché sur un calendrier d'installation des BVR. Dix ensembles de bassins représentatifs ont finalement été installés par le GEVJ et la Sudene, totalisant 84 sous-bassins, 378 pluviomètres, 57 pluviographes et plus de 3500 stations × années de données. Plus de 90% de ce dispositif était situé dans les zones semi-arides, dont les trois quarts sur le socle cristallin, imperméable et propice à la construction des açudes (Fig. 1).

(b) Compréhension et mesure des mécanismes par l'étude de bassins et de parcelles expérimentaux (1980-1990) Avec la fin des travaux d'inventaire, la nécessité d'une prise en compte de paramètres numériques descriptifs du régime hydrique des sols et de leur rôle sur l'écoulement s'impose alors petit à petit. Un dialogue productif s'établit alors avec les pédologues en quête d'une meilleure compréhension des mécanismes aux interfaces sol-plante-eau, et l'utilisation et la mise au point de nouveaux appareils et dispositifs de mesure sont entreprises. En 1980, pour répondre aux préoccupations de

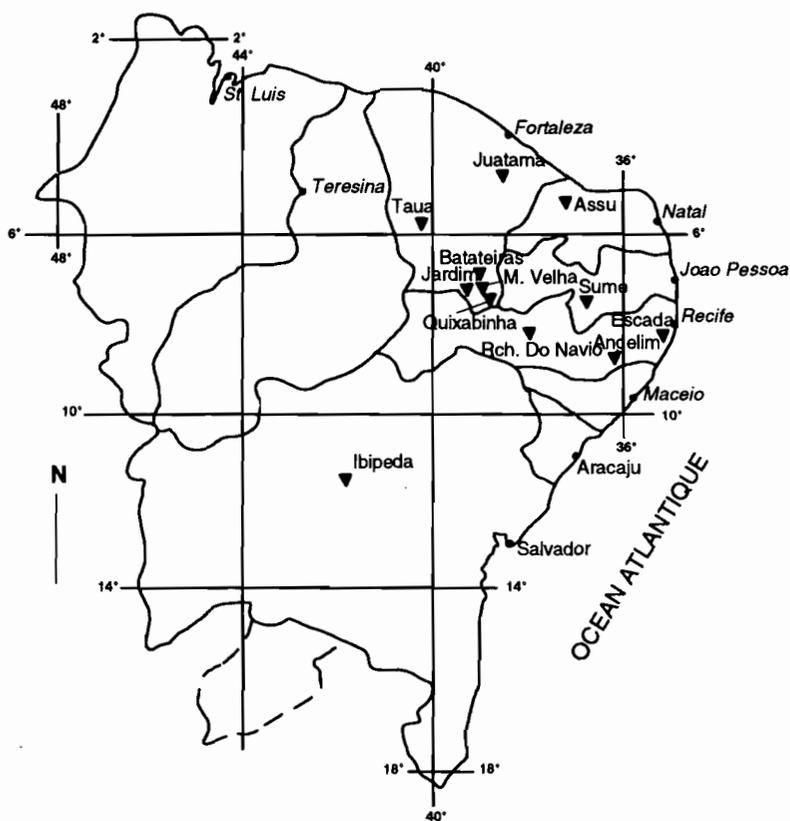


Fig. 1 Carte de situation des bassins versants représentatifs du Nordeste du Brésil.

nos partenaires brésiliens à propos de l'influence de la végétation sur les ressources en eau et en sol, a été installé, en association avec plusieurs universités brésiliennes, un bassin expérimental dans la région semi-aride de Sumé (Cadier *et al.*, 1983), puis un autre à Taua (Ferreira *et al.*, 1989). Entre 1986 et 1989, le bassin expérimental de Sumé a abrité un programme de recherche par contrat ATP-Piren passé entre l'Orstom, le CNRS et divers organismes brésiliens (Molinier *et al.*, 1989). L'ensemble de ces études a impliqué l'installation de 23 parcelles et micro-bassins expérimentaux, ainsi que l'utilisation des techniques de simulation de pluie, de tensiométrie et de mesures neutroniques. Ce programme a constitué le premier vrai travail en commun associant hydrologues et pédologues, dont le but était plus de comprendre les mécanismes que d'inventorier les ressources en eau.

(c) Étude du fonctionnement et définition de normes de dimensionnement et de gestion des petits açudes (1985-1992) A partir de 1985, pour répondre à une demande de nos partenaires et garantir l'application de nos résultats, le centre de gravité des recherches de l'Orstom à la Sudène s'est déplacé vers l'étude du dimensionnement, de la construction et de la gestion des petits açudes et de leur eau (Cadier & Dubreuil, 1986; Cadier *et al.*, 1989; Molle & Cadier, 1992).

(d) Elaboration d'une méthode de transposition hydrologique (1981-1992) La transposition des résultats vers des bassins dépourvus d'information hydrologique constituait l'objectif principal et la justification du programme de bassins représentatifs. Cette synthèse n'aurait pas été possible sans la participation active des pédologues. (Leprun *et al.*, 1983; Assuncao *et al.*, 1984; Barreto *et al.*, 1989). Après des premières tentatives d'utilisation du modèle de simulation global Simples effectuée par Campello (1979), Cadier & Vieira (1985) avaient proposé une première méthode. Elle a été ensuite refondue, complétée et simplifiée. Elle a finalement constitué le point d'orgue de la synthèse générale des études des petits bassins (Cadier, 1993) et servi de base aux méthodes de dimensionnement proposées dans le Manuel du petit açude (Molle & Cadier, 1992).

Voici maintenant quelques indications sur les points forts et les aspects les plus originaux de ces programmes.

Compréhension des mécanismes sur Bassins Versants Expérimentaux (BVE): études conjointes entre hydrologues et pédologues (1980-1990)

En 1980, suite au démarrage d'un nouveau programme d'étude de conservation des sols mené par Leprun (1984-1985) à la Sudene, et à une demande de nos partenaires brésiliens, on lançait un nouveau programme appelé « bassin expérimental ».

Du côté de l'Orstom, l'engouement pour les BVR classiques était retombé, les idées d'une nouvelle génération d'hydrologues et de pédologues se répandaient dans le sens d'une compréhension beaucoup plus fine des mécanismes. On assistait à l'émergence de concepts nouveaux comme les états de surface ou l'utilisation de techniques comme la télédétection. Les premiers programmes de recherche associant hydrologues et pédologues de l'Orstom ont d'ailleurs démarré à cette époque (Collinet & Valentin, 1979).

Ces études sur BVE sont complémentaires du programme hydrologique de BVR cité précédemment et d'un nouveau programme pédologique d'étude de l'érosion, mené par Leprun (1983) entre 1980 et 1984. Ces études visaient à mieux connaître les mécanismes hydrologiques et érosifs sur un ensemble de petits dispositifs expérimentaux (parcelles, micro-bassins et BVR dont les tailles variaient entre 100 m² et plus de 100 km²), à quantifier l'influence des variations de la couverture végétale sur les écoulements et les pertes en terre, en vue de rationaliser la gestion des versants et de leurs ressources hydriques. Pour cela Cadier & Leprun s'inspirèrent et adaptèrent les dispositifs de mesure mis en place par l'Orstom dans le cadre du projet MAB-UNESCO à sur le bassin de Taï, en Côte d'Ivoire (Collinet, 1984).

De fortes crues survenues et correctement mesurées dès la première campagne ont permis de mettre en évidence un accroissement des écoulements variant entre cinq et dix lorsque l'on élimine la végétation. La variation des pertes en terre était plus importante encore. Ces résultats inédits, rapidement obtenus, ont sans doute assuré la continuité de l'ensemble du programme d'étude de petits bassins versants représentatifs qui était fortement remis en question dans ces années 1982-1983. Les données des années suivantes montrèrent la bonne marche du dispositif installé et permirent de préciser et confirmer ces résultats. On a pu ainsi montrer que la dégradation de la surface du sol qui suivait le défrichement pouvait multiplier les écoulements par un facteur pouvant atteindre 20.

Les objectifs de l'opération de recherche de l'ATP-Piren réalisée à Sumé sur le bassin expérimental étaient, de leur côté, d'analyser et de modéliser les mécanismes contrôlant la dynamique et les bilans hydriques et minéraux à différentes échelles (1 m^2 , 100 m^2 , 1 ha et 10 km^2), sous divers couverts végétaux et traitements sur un même type de sol, le sol brun eutrophe à rares inclusions de vertisols. Ce travail, où intervenaient pour la première fois dans la région de manière étroite et concertée hydrologues et pédologues, a permis de préciser la circulation de l'eau et des solutés, à diverses échelles emboîtées, sous pluies naturelles et simulées, dans une couverture pédologique homogène et représentative. Les principaux résultats ont mis en évidence et expliqué le rôle et le mode d'intervention de deux facteurs prépondérants dans le déterminisme de la circulation des solutions: le couvert végétal qui règle l'infiltration superficielle et l'organisation pédologique qui règle les circulations internes. Un modèle calé sur les deux sols, bruns et vertisol, quantifie les flux et les intègre dans l'espace. Du point de vue pratique, l'infiltration sur sol nu paraît réglée sur sol nu par la conductivité hydraulique de la structure lamellaire des premiers centimètres de sol et le ruissellement survient rapidement alors qu'à l'inverse, sous végétation, la structure superficielle granulaire du sol permet une infiltration trois fois supérieure. Le ruissellement ne se manifeste alors que lorsque l'humectation de l'ensemble du profil est accomplie. Les résultats obtenus sur le transport des solutés indiquent que les sols sous végétation donnent naissance à des eaux moins minéralisées que lorsqu'ils sont nus. Les flux géochimiques d'entrée par la pluie et de sortie après ruissellement, infiltration et drainage sont fournis. Des recommandations utiles pour la mise en culture et l'irrigation sont émises (Molinier *et al.*, 1989).

Mise au point d'une méthode de transposition avec la participation des pédologues (1981-1992)

Complexité des mécanismes que l'on veut transposer Le principal objectif des études de BVR était l'évaluation des écoulements annuels ou modules et de leur variabilité dans cette région semi-aride de près d'un million de km^2 . L'estimation des paramètres des crues constituait un objectif secondaire.

Les premières tentatives effectuées fin 1979, pour transposer les résultats obtenus sur le bassin représentatif du Riacho do Navio, furent un échec. Malgré un réseau de plus de 70 appareils, suivis pendant 7 ans, accompagné de toutes les mesures physiques et morphologiques recommandées, on s'aperçut que l'on était incapable de comprendre, d'interpréter les différences de comportement entre les divers bassins et, *a fortiori*, de les extrapoler vers un quelconque bassin voisin. La raison principale de cet échec était l'absence de prise en compte des caractéristiques de la couverture végétale et des sols.

Le bassin de Juatama constitue un bon exemple de la complexité possible des toposéquences et des mécanismes hydrologiques (Fig. 2). On observe, en effet, dans ce bassin, deux associations de zones imperméables dont les écoulements sont absorbés par la zone perméable située immédiatement en aval. La première, située en amont, est constituée d'affleurements granitiques, qui surplombent des sols podzoliques perméables qui emmagasinent l'eau. La seconde, située plus bas, associe des solonetz peu perméables, à faible capacité de rétention, à des planosols plus épais qui ne ruissellent que lorsqu'ils sont saturés! Ainsi, en dépit du modelé accentué, par deux fois le long de

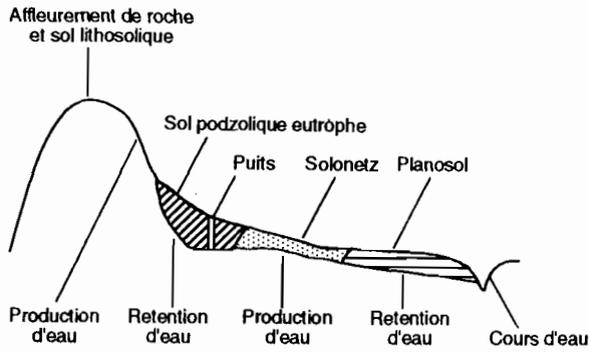


Fig. 2 Toposéquence typique dans le bassin de Juatama.

la pente, l'écoulement se trouve entravé, si bien qu'il est souvent très faible en bas de pente.

Recherche des facteurs conditionnels: réflexions sur le rôle et l'importance des paramètres explicatifs accessibles La transposition des caractéristiques hydrologiques vers des bassins dépourvus d'information hydrologique doit s'effectuer en fonction de caractéristiques physiques et climatiques facilement accessibles. Dans ce qui suit, les principaux résultats et quelques points de réflexion seront livrés, en comparant, quand cela est possible, les résultats du Nordeste avec ceux trouvés en Afrique.

(a) **Le coefficient L_{600} permet de s'affranchir de la pluviométrie** Une relation de forme exponentielle entre la lame écoulée moyenne annuelle (L) et le total pluviométrique moyen annuel (P) a été établie. Trois paramètres suffisent à la définir. Elle s'écrit:

$$L = C L_{600} e^{A(P - 600)} \quad (1)$$

Les coefficients (C) et (A) ont été calculés pour les principales zones climatiques du Nordeste. (L_{600}) correspond à la lame écoulée moyenne annuelle pour une précipitation annuelle moyenne de 600 mm dans le Sertão. C'est donc un coefficient qui permet de caractériser simplement et de comparer l'aptitude à l'écoulement de bassins différents, en s'affranchissant de la pluviométrie moyenne réelle. Rodier (1976) avait procédé de la même façon dans le Sahel africain en ramenant toutes les caractéristiques de ses bassins à une pluviométrie standard de 400 mm.

(b) **Emergence des deux facteurs principaux: sol et végétation** Une analyse multivariée de l'ensemble des facteurs explicatifs de l'écoulement indique clairement, tout comme dans les zones sèches d'Afrique, le rôle prépondérant du sol et de la végétation, qui constituent, avec les précipitations les facteurs explicatifs principaux des volumes écoulés annuels (Fig. 3). Cadier (1993) a proposé l'équation (2), qui explique 75% de la variance des écoulements à partir de deux facteurs représentant l'influence du sol (CSOL) et de la végétation (CVEG):

$$L_{600} = 25,9CSOL + 19,7CVEG - 95 \text{ mm} \quad (2)$$

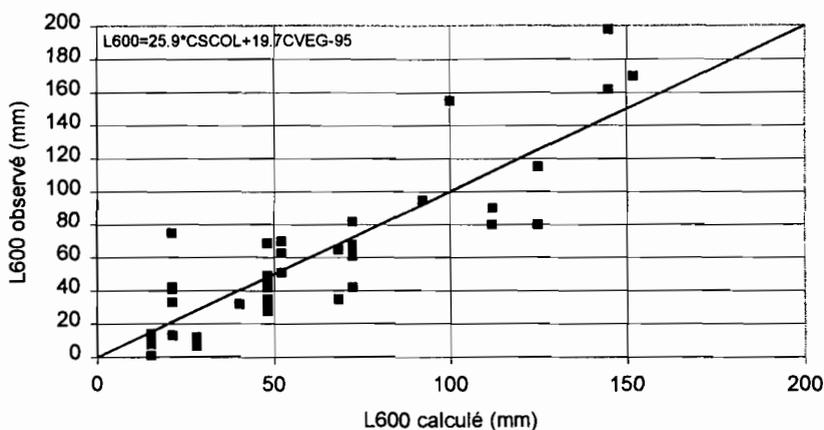


Fig. 3 Explication des écoulements (L_{600}) par le sol (CSOL) et la végétation (CVEG).

La collaboration des pédologues s'est donc avérée essentielle, tout d'abord pour comprendre et quantifier les mécanismes à l'échelle du profil pédologique, du versant élémentaire puis du bassin versant, ensuite pour établir une typologie hydrologique des sols et enfin pour en proposer des valeurs de L_{600} .

Pour cela, Leprun *et al.*, (1983), puis Assunção *et al.*, (1984) ont réalisé une cartographie de toutes les unités de sols de tous les BVR à une échelle variant entre le 1:50 000 et le 1:100 000, accompagnée d'une analyse du fonctionnement hydrique et des mécanismes responsables de la génération de l'écoulement, à l'échelle du profil et du versant. Cette cartographie pédologique a été effectuée dans donnant la priorité aux caractéristiques hydrodynamiques des sols. De nombreuses mesures répétées de perméabilité effectuées par différentes méthodes (Müntz, simulation de pluies, tests de laboratoire) couplées à des observations de terrain (temps de ressuyage, écoulement superficiel) sur 60 types de sol, ont permis de classer ces sols selon leur perméabilité, puis d'en effectuer une première typologie.

La méthode de transposition hydrologique que nous avons finalement proposée a été conçue pour être utilisée dans tout le Nordeste. Pour proposer une valeur de L_{600} à chacun des principaux types de sol recensés, toute l'information hydrologique et pédologique disponible a été utilisée. Il s'agit non seulement de l'information obtenue sur les BVR et BVE mentionnée ci-dessus, mais également celle en provenance du réseau général hydro-météorologique et de la couverture cartographique pédologique de base. Ce travail, relativement complexe est décrit par Cadier (1993). Il serait trop long de détailler ici. La végétation est finalement prise en compte par un simple facteur correctif que l'on peut déterminer en se référant à des couvertures végétales types.

(c) Le rôle des autres facteurs conditionnels L'influence sur l'écoulement moyen annuel des autres facteurs conditionnels est beaucoup moins nette. Le nombre et la densité d'açudes et dans une moindre mesure la surface des bassins tendent à réduire l'écoulement. En revanche, l'échantillon des 42 bassins utilisés n'a pas permis de mettre une évidence une quelconque influence du relief, de l'altitude ou de la densité de drainage.

- (i) *Les açudes* Le stockage de l'eau dans les açudes provoquera, de manière évidente, une diminution des écoulements à la sortie du bassin. Leur influence s'accroîtra les années déficitaires, quand ils retiendront, pour se remplir, une part importante des faibles écoulements, alors que les années excédentaires, ils transmettront, au contraire, vers l'aval toute l'eau qu'ils recevront et qui risquera parfois de provoquer des crues catastrophiques en cas de rupture. Cadier & Dubreuil (1986) ont montré que les açudes diminuent les écoulements et en accentuant l'irrégularité.
- (ii) *La surface du bassin* Une diminution des écoulements a pu être vérifiée lorsque la surface des bassins augmente. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette diminution: les capacités de drainage des bassins en fonction des sols et du relief, la proportion des zones alluviales planes épaisses et perméables de l'aval et le nombre de petits barrages. Cette diminution est beaucoup moins marquée dans le Nordeste brésilien qu'en Afrique. Elle peut être expliquée par la surrection constante du socle et par la rareté des zones alluviales sableuses dans le Nordeste. En Afrique, l'endoréisme est fréquent, les zones alluviales sont importantes et le nombre de petits barrages est moindre. Pour illustrer ceci, signalons que sur le bassin représentatif de Tauá, on n'observe aucune diminution significative du module quand la taille du bassin passe de 1 ha à 10 km². En revanche, on observe une diminution de l'écoulement proche de 50 % entre ces bassins de moins de 10 km² et le bassin principal de 190 km² ou le grand bassin de 6000 km² du Rio Jaguaribe à Arneiroz. Il semble que ce soient surtout les açudes qui sont responsables de cette diminution.
- (iii) *Le relief* Contre toute attente, le relief n'est pas un facteur explicatif significatif des modules, ce qui amène à penser que:
- en Afrique, ce sont surtout les grandes zones endoréiques qui favorisent une infiltration générale des écoulements et qui donnent l'essentiel de sa consistance à la relation entre le relief et l'écoulement. Ces zones sont rares, voire inexistantes dans le Nordeste;
 - les sols ont été choisis comme facteur explicatif principal. Or le relief influe sur la formation et l'épaisseur des sols, les sols les moins épais se développant souvent sur les reliefs les plus accentués. On peut donc penser que le relief est, dans une certaine mesure, déjà pris en compte par le facteur sol;
 - l'échantillon de bassins dont nous disposons induit probablement un biais. En effet les bassins dont le relief et l'altitude sont les plus forts sont situés sur les bords de plateaux calcaires relativement perméables, qui ne produisent que peu d'écoulement. Ceci induit une influence négative paradoxale dans la relation entre le relief et l'écoulement.
- (iv) *L'altitude* De même, l'échantillon des bassins étudiés n'a pas permis de mettre en évidence une influence significative de l'altitude. Comme pour le relief, on peut soupçonner un biais de cet échantillon.
- (v) *La densité de drainage et la forme du bassin* L'influence de la forme du bassin ou de la densité de drainage sur les volumes écoulés annuels n'a également pas pu être mise en évidence. La densité de drainage est généralement considérée comme un facteur géomorphologique pertinent, mais elle a été estimée dans le Nordeste de manière très hétérogène; il est de plus difficile de comparer des bassins dont les tailles varient entre 1 ha et 400 km².

EN GUISE DE CONCLUSION: QUELLES SONT LES CONVERGENCES DES REGIMES HYDROLOGIQUES ENTRE LE NORDESTE ET LE SAHEL

Outre l'intérêt évident de ces études pour améliorer la connaissance et l'utilisation des ressources en eau du Nordeste semi-aride, une comparaison du milieu, des régimes hydrologiques et des techniques d'étude utilisées sur les continents africain et sud-américain ouvre des perspectives riches d'enseignements. Ces deux grandes zones sèches ont évidemment de nombreux points en commun: climat tropical semi-aride, socle géologique semblable, régimes hydrologiques irréguliers et intermittents, mais également des différences (Leprun & Siveira, 1992) qui sont résumées dans le Tableau 1. Il s'agit de l'irrégularité de plus ou moins grande du climat, de la tectonique, du relief, des sols, de la végétation et les structures foncières.

Les régimes hydrologiques des deux continents présentent des analogies: écoulements faibles, intermittents et irréguliers dans les deux cas, mais il y a des différences bien interprétées par Rodier (1993). On observe dans le Nordeste, sur les petits bassins, une occurrence moindre des effets dus à l'encroûtement et à l'imperméabilisation de la surface du sol, généralement mieux structurée et protégée par la végétation. Pour les plus grands bassins, le relief plus vigoureux déterminera une diminution moins importante des écoulements avec la surface que dans le cas des bassins africains, mais les sols du Nordeste, plus riches chimiquement, exporteront plus de matières dissoutes.

Les techniques hydrologiques et la conception d'ensemble des programmes présentent également des différences. Dans le Nordeste, on a commencé par effectuer un zonage général de l'ensemble de la zone qui a abouti à une planification et un calendrier d'installation des bassins pour représenter les principales zones homogènes identifiées. Les études ont ensuite été directement exécutées par le service hydrologique brésilien de la Sudene, l'Orstom se limitant à un rôle de conseiller. L'objectif principal des études y était l'estimation des écoulements annuels en vue de leur régularisation par de petits barrages. L'estimation des débits de pointe des crues ne constituait qu'un

Tableau 1 Principales différences entre le Nordeste sec et l'Afrique sèche.

Facteurs	Nordeste sec	Afrique sèche
Pluviométrie	Longue période de pluies possibles Très forte irrégularité	Saison des pluies concentrée
Végétation	Couvert dense et étendue (caatinga) Bonne protection du sol	Savane arborée lâche Brûlis annuels
Relief Tectonique	Ondulé à accentué Active (surrection)	Plat à peu accentué Stable
Influence anthropique	Propriétés closes et protégées Très grand nombre d'açudes	Cultures et élevage itinérants Nappes phréatiques fréquentes
Sols	Peu épais, riches, bien structurés en surface	Epais, pauvres, encroûtement superficiel fréquent
Comportement hydrodynamique	Sols drainants, bassins exoréiques, eaux minéralisées	Sols imperméables en surface, grands bassins endoréiques

objectif secondaire, alors qu'il était prioritaire en Afrique. Dans le Nordeste, on a pu utiliser les données d'un réseau général hydropluviométrique plus développé et d'une cartographie pédologique spécifique qui a fait défaut en Afrique.

REFERENCES

- Assunção, M. S. de, Leprun, J. C. & Cadier, E. (1984) Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: Açú, Batateiras, Missão Velha e Quixabinha; características físico-climáticas. (Síntese dos resultados). *Hidrologia* 22, 52. Recife, Sudene-DRN-HME, Brésil.
- 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 VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH* (Foz do Iguaçu, Paraná, Brésil), vol. 1, 666-676.
- Cadier, E. (1993) *Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien semi-aride – Transposition à des bassins non étudiés*. Orstom Etudes et Thèses, Paris.
- 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. *XIXe Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris*.
- Cadier, E., Freitas, R. J. & Leprun, J. C. (1983) Bacia experimental de Sumé; instalação e primeiros resultados. In: *Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos* (Blumenau, Brésil), vol. 1, 69-90.
- 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* (São Paulo, Brésil), vol. 1, 217-230.
- Collinet, J. (1984) Hydrodynamique superficielle et érosion comparée de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire). In: *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (ed. par D. E. Walling, S. S. D. Foster & P. Wurzel) (Proc. Harare Symp., July 1984), 499-516. IAHS Publ. no. 144.
- Collinet, J. & Valentin, C. (1979) Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 18(4), 283-328.
- Dubreuil, P., Chaperon P. & Guiscafré J. (1972) *Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'Orstom: années 1951-1969*. Orstom, Paris.
- Dubreuil, P., Girard, G. & Herbaud, J. M. (1968) *Monographie hydrologique du bassin du Jaguaribe (Ceará-Brésil)*. Orstom, Paris.
- Ferreira Filho, W. M., Cadier, E. & Martins, C., Jr (1989) Avaliação de escoamento e erosão na Bacia experimental de Tauá-CE. In: *Anais VIII Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos* (Foz do Iguaçu, São Paulo, Brésil), vol. 1.
- Guichard, E. (1970) *Les sols du Bassin du Rio Jaguaribe*. Mém. Orstom, no. 40, Paris.
- Leprun, J. C. (1983) *Relatório de fim de Convênio de manejo e conservação do solo no Nordeste brasileiro (1982-83)*. Recife, Sudene-DRN.
- Leprun, J. C. (1984-1985) La conservation et la gestion des sols dans le Nordeste brésilien. Particularités, bilan et perspectives. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 214, 257-284.
- Leprun, J. C. (1994) *Orstom-Bresil, Trente Ans de Coopération Scientifique*. Orstom, Paris.
- 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). *Hidrologia*, 15. Recife, Sudene-DRN-HME, Brésil.
- Leprun, J. C., Molinier, M., Cadier, E., Fotius, G., Galindo O., Ramos, F. S. de & Souza, H. R. de (1995) Les sécheresses de la région Nordeste du Brésil et leurs conséquences. *Sécheresse* 1(6), 23-33.
- Leprun, J. C. & Silveira, C. O. da (1992) Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides: le Sahel de l'Afrique de l'Ouest et le Nordeste brésilien. In: *L'Aridité, une Contrainte au Développement*, 221-244. Orstom, Didactiques.
- Molinier, M. & Cadier, E. (1984-1985) Les sécheresses du Nordeste brésilien. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 21(4), 23-49.
- 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. « 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.
- Molle, F. (1991) Caractéristiques et potentialités des « Açudes » du Nordeste brésilien. Thèse de doctorat USTL, Montpellier.
- Molle, F. & Cadier, E. (1992) *Manual do Pequeno Açude*. Sudene, Coopération Française, Orstom.
- Nouvelot, J. F. (1974) *Planificação da implantação de Bacias Representativas. Aplicação à área da Sudene*. Recife, Rapport Sudene-DRN.
- Rodier, J. A. (1976) Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 13(4), 269-306.
- Rodier, J. A. (1989) Ecoulements de surface dans les bassins perméables du Sahel. Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. *Hydrol. Continent.* 4(2), 123-138.
- Rodier, J. A. (1993) Postface. In: *Hydrologie des petits bassins du Nordeste Brésilien semi-aride – Transposition à des bassins non étudiés* (ed. par E. Cadier), 323-335. Coll. Etudes et Thèses, Orstom, Paris.