

# Systèmes morphopédologiques et gestion de l'eau dans le nord-est du Brésil et le sud de l'Inde : une analyse comparative et multi-échelles

François BÉTARD\*, Yanni GUNNELL\*\*, Gérard BOURGEON\*\*\*,

\* Maître de conférences à l'Université Paris Diderot-Paris 7, CNRS UMR 8586 Prodig, case courrier 7001, 75205 Paris cedex 13. E-mail : francois.betard@univ-paris-diderot.fr

\*\* Professeur à l'Université Lumière-Lyon 2, CNRS UMR 5600 Environnement, Ville, Société, 5 avenue Pierre Mendès-France, 69500 Bron . E-mail : yanni.gunnell@univ-lyon2.fr

\*\*\* Ingénieur de recherche au CIRAD, UPR Recyclage et Risque, TA B 78/01, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier. E-mail : bourgeon@cirad.fr

**Résumé :** Le nord-est du Brésil et le sud de l'Inde sont deux régions tropicales semi-arides qui partagent au moins deux traits communs : (i) d'une part des systèmes morphopédologiques constitués par de vastes plaines à inselbergs portant des Luvisols chromiques mondialement peu répandus ; (ii) d'autre part des stratégies de gestion de l'eau par petits réservoirs appelés açudes au Brésil et tanks en Inde, pour faire face à des sécheresses récurrentes. Au delà de ces similitudes, l'utilisation des ressources en sol et en eau diffère cependant notablement entre ces deux régions semi-arides. Ceci s'explique par des différences dans les conditions démographiques, dans l'organisation des structures agraires et dans les pratiques agro-pastorales traditionnelles ; mais aussi par des différences subtiles dans les mosaïques écologiques et pédologiques de ces milieux respectifs. Alors que la plupart des açudes brésiliens sont dévolus à l'abreuvement du bétail et à l'approvisionnement de la population en eau domestique durant la saison sèche, l'irrigation gravitaire des cultures est pratiquée de façon systématique à l'aval des tanks indiens depuis au moins un millénaire. À une époque où le spectre de pénuries alimentaires revient, et devant le succès de l'agriculture irriguée indienne et la sécurité alimentaire qu'elle procure, les perspectives de transfert technologique vers le Nordeste brésilien sont discutées à la lumière de l'ensemble des contraintes morphopédologiques, historiques et socio-culturelles propres à chaque région. On aborde en particulier le problème du dimensionnement de l'açude pour que le plan d'eau domine des sols irrigables situés entre 10 et 20 mètres au-dessus du talweg ; celui des faibles concentrations démographiques ( $<30 \text{ hab km}^{-2}$ ) et des contraintes foncières liées au système latifundiaire hérité de l'histoire coloniale ; ou encore l'absence de tradition d'irrigation chez les petits agriculteurs familiaux du Nordeste brésilien, conduisant ainsi à envisager d'autres types de mise en valeur de l'eau des açudes dans une perspective de développement durable.

**Mots-clé :** sols tropicaux, systèmes agraires, gestion de l'eau, irrigation, zone semi-aride, Brésil, Inde.

**Abstract :** *Soil-landscape systems and water management in Northeast Brazil and South India: a comparative, multiple-scale analysis. The semiarid tropical regions of north-eastern Brazil and southern India share at least two features: (i) soil-landscape systems consisting of vast, low-gradient erosional plains covered by an unusual mosaic of chromic Luvisols and Cambisols; and (ii) water harvesting strategies organized around small reservoirs called açudes in Brazil and tanks in India, which are designed to mitigate the effects on agriculture of recurring droughts. Beyond these similarities, the uses of soil and water resources, however, differ significantly. We show that this can be explained by differences in demographic conditions, in the organization of land tenure and traditional farming practices, but also by subtle differences in the soils and in ecological patterns. While most Brazilian açudes are designed to supply water to livestock and humans during the dry season, Indian tanks have been used as a common property resource for crop irrigation for over 1000 years. At a time when the threat of food shortages in low-latitude countries looms large, and given the success in India of traditional irrigated agriculture and the food security it provides, the scope for technology transfer from India to the Brazilian Nordeste is discussed in the light of the morphopedological, historical and cultural characteristics of the two study areas. We address issues of reservoir sizing for the irrigation of croplands that are located 20 to 30 metres*

above the valley floor, and problems linked to low population densities ( $<30 \text{ km}^{-2}$ ) and to large farming estates inherited from colonial times. Because irrigation is not traditional among smallholders in north-eastern Brazil, we consider other potential options of water optimization for sustainable development in agriculture.

**Key words :** tropical soils, land tenure, water management, irrigation, semiarid tropics, Brazil, India.

## Introduction

Les régions tropicales ayant des caractéristiques physiques similaires ont parfois fait l'objet d'études de géographie comparative. L'objectif d'une telle démarche est généralement de rechercher des causes aux différences de développement économique constatées, et d'éventuellement proposer des idées de transfert technologique susceptibles d'accélérer le processus de développement des régions considérées : ainsi le Tamilnad indien et la Tanzanie orientale (Morgan, 1988), l'Inde du Sud et l'Afrique de l'Ouest (Gourou, 1991 ; Gunnell, 1997), ou encore le Nordeste brésilien et le Sahel africain (Leprun, 1993). Dans une démarche d'analyse identique, une comparaison entre les régions semi-arides du Nordeste brésilien et du sud de l'Inde, jamais réalisée jusqu'à présent, nous a paru s'imposer, afin de souligner les similitudes frappantes qui ressortent d'une analyse comparative des milieux physiques de ces deux régions. Parmi les points de similitude les plus

remarquables et jusqu'à présent restés inaperçus, l'existence de Luvisols chromiques, mondialement peu répandus et chimiquement fertiles, a pu être mise en évidence à la lumière de recherches dans le sud de l'Inde (Bourgeon, 1987, 1992), puis, plus récemment, dans le nord-est du Brésil (Bétard, 2007). Une autre analogie étonnante concerne la multiplicité des réservoirs de stockage des eaux superficielles, appelés *açudes* au Brésil et *tanks* en Inde, créés pour faire face à une variabilité climatique quasi-aléatoire. L'étroite ressemblance entre conditions morphopédologiques et formes d'aménagement hydraulique invite à considérer les perspectives de transfert de l'irrigation, durable puisque pratiquée en Inde avec succès depuis plus d'un millénaire autour des *tanks*, à la zone semi-aride du Nordeste brésilien, où l'utilisation des *açudes* est généralement limitée à la seule alimentation en eau des hommes et des troupeaux.

## Nordeste brésilien et Inde du Sud : une étonnante similitude des conditions physiques et des aménagements hydrauliques

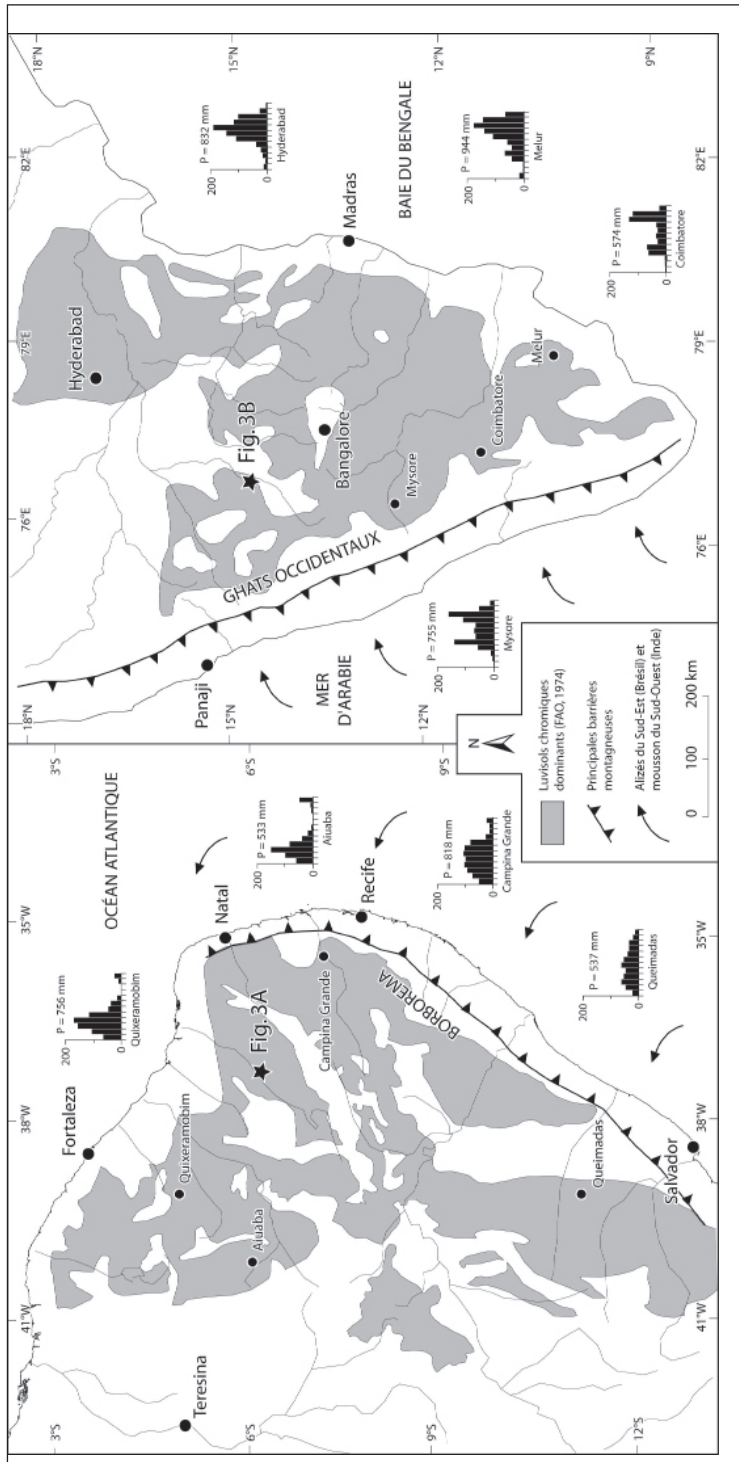
Situées de part et d'autre de l'équateur, les deux régions semi-arides du Nordeste brésilien et du sud de l'Inde ont une extension géographique similaire, comprise entre 3 et 12° de latitude sud pour la première, et entre 9 et 18° de latitude nord pour la seconde (Fig. 1).

### Similitude des milieux physiques

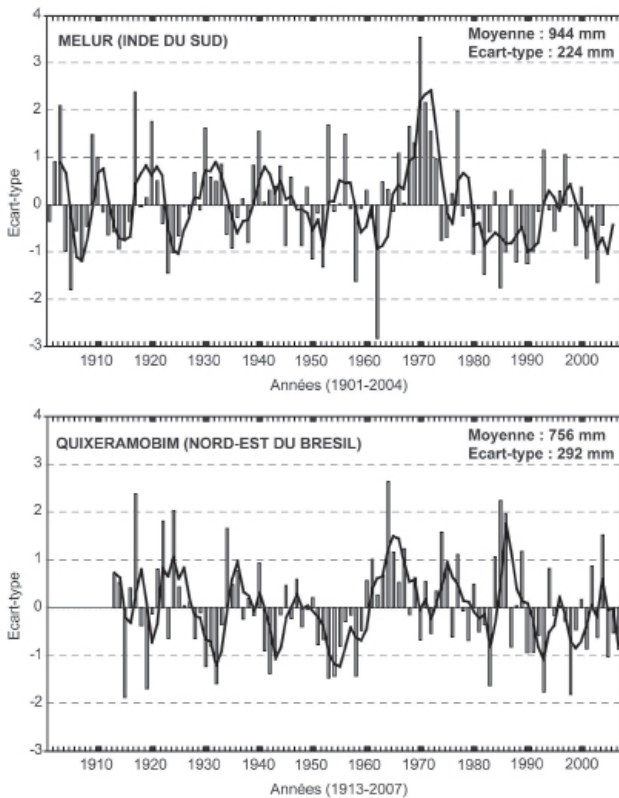
Le nord-est du Brésil et le sud de l'Inde sont deux régions tropicales au climat principalement semi-aride, où la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 400 et 950 mm (Fig. 1). Le climat, à saisons sèches et humides alternées, est chaud, avec des températures moyennes annuelles autour de 25-26° C. Dans les deux cas, la pluviosité

montre une importante variabilité interannuelle (Fig. 2), donnant lieu à des périodes de sécheresse récurrente (Leprun *et al.*, 1995 ; Singh *et al.*, 1992 ; Singh et Sontakke, 1999) dont la fréquence semble liée à la cyclicité ENSO, au moins au Brésil (Hastenrath, 2006). Au-delà de ces similitudes climatiques, le régime des précipitations diffère cependant notablement entre les deux régions, et affiche même des variantes à l'intérieur de chaque région.

Dans le Nordeste, la zone semi-aride du Sertão présente deux régimes pluviométriques différents : (i) celui du Sertão septentrional, déterminé par le déplacement annuel de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), est clairement unimodal,



**Figure 1 :** Nordeste brésilien et Inde du Sud : répartition des Luvisols chromiques et diagrammes pluviométriques pour quelques stations des deux régions semi-arides. Noter que la concentration géographique des petits réservoirs s'inscrit principalement dans l'aire de répartition des Luvisols chromiques, située dans les deux cas en position abritée par rapport aux flux des alizés ou de mousson. Les étoiles indiquent la localisation des figures 3A et 3B.



**Figure 2** : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Melur (Tamil Nadu, Inde du Sud) et à Quixeramobim (Ceará, Nordeste brésilien). Données pluviométriques normalisées selon la moyenne et l'écart-type respectifs à chaque station (source des données brutes : SUDENE, FUNCEME, India Meteo. Dept. Poona, Rainfall Statistics of Tamil Nadu, PWD Madurai). La ligne noire matérialise la moyenne mobile sur 3 années.

avec un seul pic de saison des pluies centré sur les mois de mars-avril (stations de Quixeramobim, Aiuaba et Campina Grande : Fig. 1) ; (ii) celui du Sertão méridional (ou Sertão bahianais), influencé par des fronts froids venant du sud et des perturbations complexes en provenance de l'ouest, ne présente pas de mode très net, avec des pluies mieux réparties sur l'année (station de Queimadas).

En Inde du Sud, le régime pluviométrique fondamental est bimodal, c'est-à-dire à deux saisons des pluies, intervenant au printemps et à l'automne (station de Coimbatore : Fig. 1). À l'intérieur de la péninsule indienne, en fonction de l'influence respective des moussons du Sud-Ouest et du Nord-Est, le régime des précipitations subit les modifications suivantes : (i) vers l'ouest, les pluies de la mousson du Sud-Ouest viennent renforcer le maximum de printemps et le régime est nettement bimodal (station de Mysore) ; (ii) vers l'est, le maximum de printemps s'atténue progressivement au profit de la saison pluvieuse d'automne, de plus en plus retardée du nord au sud (stations de Hyderabad et de Melur).

Le Nordeste brésilien et l'Inde du Sud ont également en commun d'être de vieux fragments d'un socle cristallin précambrien, constitué essentiellement de gneiss, de migmatites et de granites. Sur ces roches anciennes se sont développés des systèmes morphopédologiques similaires, formés par de vastes plaines à inselbergs plus ou moins disséquées et portant, entre autres sols, des Luvisols chromiques<sup>1</sup> (FAO, 2006) qui représentent les éléments les plus évolués des couvertures pédologiques (Fig. 1). À côté de ces sols évolués, on trouve dans les deux cas des Cambisols correspondant

1.- Dans l'ancienne classification française des sols, ces sols étaient dénommés « sols fersiallitiques » mais ce vocabulaire apparaît aujourd'hui désuet car il se réfère à des méthodes d'identification et de classification des sols qui n'ont plus cours. De même, dans l'ancienne classification brésilienne (Projeto Radambrasil, 1981), ces sols étaient dénommés « brunos não cálcicos » (trad. : bruns non calciques), ce qui les a souvent fait confondre avec les « sols bruns eutrophi tropicaux » de l'ancienne classification française qui sont pour leur part des sols peu évolués. La nouvelle classification brésilienne (SiBCS, 2005) a proposé de les renommer « Luvisolos crômicos », en accord avec la classification mondiale de la WRB (FAO, 2006) mais la correspondance entre les anciens sols « brunos não cálcicos » et les « Luvisolos crômicos » n'est peut être pas aussi parfaite que le suggèrent certaines cartes. Pour être qualifié de « chromique » un Luvisol, qui doit être tout d'abord un sol lessivé relativement bien saturé en bases échangeables, doit aussi être très rouge, ce qui n'est pas le cas de tous les anciens sols « brunos ».

à des sols peu évolués quelle qu'en soit la raison (zones d'entaille récente au Brésil ou dépôts colluviaux en Inde) ou encore des Planosols (au Brésil) et des Vertisols (en Inde), ces deux derniers types étant généralement confinés aux points bas de la topographie (axes de drainage).

Contrairement aux régions semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, les altérations du socle cristallin sont peu épaisses (<10 m) dans les zones semi-arides brésilienne et indienne, et les affleurements rocheux sont relativement fréquents au milieu des manteaux d'arènes à smectites. Les horizons pédologiques de surface présentent de ce fait une bonne réserve minérale constituée par les minéraux non ou partiellement altérés, des argiles à haute activité (CEC par kilogramme d'argile >24 cmoles) et un complexe absorbant saturé, donc une fertilité chimique naturelle relativement élevée.

Dans les deux régions, la végétation naturelle est une forêt sèche décidue, qui prend le nom de « caatinga » au Brésil (ce qui signifie « forêt blanche » en *tupi*). Cette dernière est une véritable forêt basse et sèche, souvent dense et continue, de 2 à 5 m de hauteur et à strate graminéenne rare ou absente. Cependant, à la différence du Brésil où seulement 5 % de la superficie du Sertão est cultivée, l'agriculture domine très largement dans le paysage indien, et la forêt sèche ne subsiste qu'à l'état de reliques dégradées sur les reliefs résiduels qui parsèment la plaine semi-aride et dans quelques parcs nationaux.

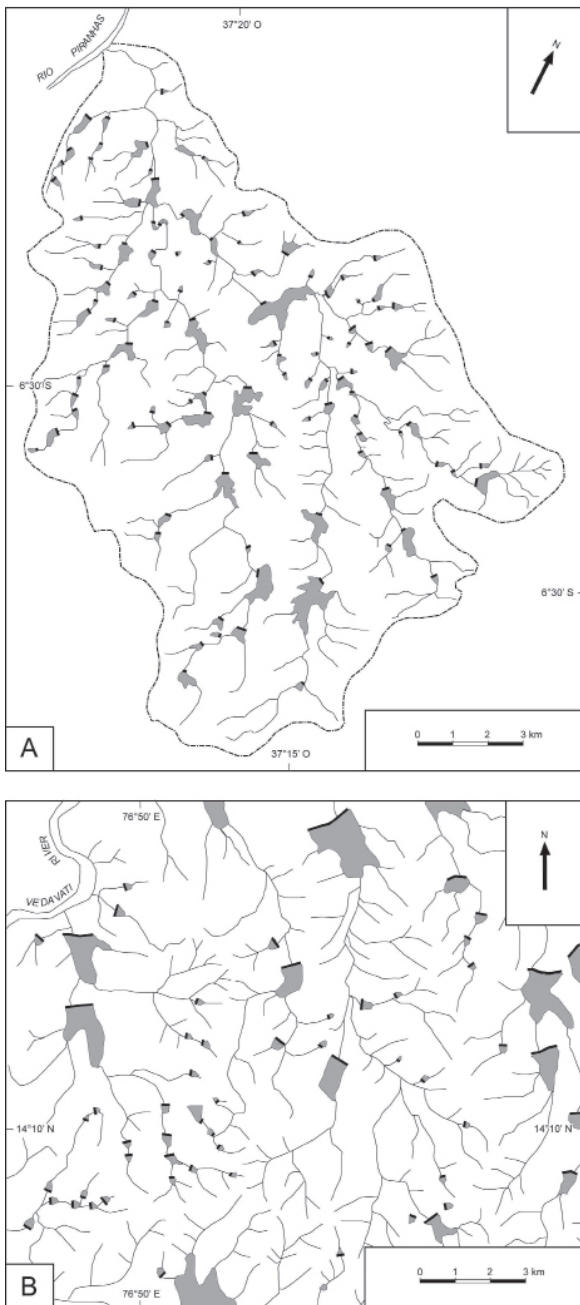
Enfin, les ressources hydriques et les conditions hydrologiques sont similaires entre les deux régions, qui possèdent chacune un réseau hydrographique intermittent et seulement deux grands fleuves pérennes : le Rio São Francisco et le Rio Parnaíba dans le Nordeste, la Krishna et la Cauvery en Inde. L'essentiel du réseau hydrographique est donc constitué de petits cours d'eau, ou *riachos* au Brésil, à régime saisonnier ou temporaire, qui peuvent même ne pas couler certaines années sèches et que les nombreux aménagements effectués en Inde ont contribué à rendre secs. Dans ces zones de substrat cristallin, seuls des manteaux d'arènes peu épais et quelques diaclases peuvent finalement stocker un volume réduit d'eau souterraine. En revanche, les sols minces et peu perméables favorisent les écoulements superficiels, et donc les possibilités de stockage de l'eau ruisselée dans de multiples petits réservoirs appelés *açudes* au Brésil et *tanks* en

Inde. De tels réservoirs sont rares dans les régions sédimentaires du Nordeste et sur les basaltes du Deccan.

### Convergence dans les stratégies de gestion de l'eau par petits réservoirs

Pour faire face à une variabilité climatique dont la périodicité est quasi-aléatoire, les habitants des deux régions ont construit, depuis près de deux millénaires en Inde et seulement deux siècles au Brésil, des petits barrages collinaires, dont la multiplicité contribue aussi aujourd'hui à une certaine ressemblance paysagère entre le Nordeste brésilien et l'Inde du Sud (Fig. 3). Éléments traditionnels de deux civilisations agraires aux histoires fort différentes, ils constituent pourtant de rares exemples de gestion séculaire de l'eau autour de petits réservoirs à travers les Tropiques semi-arides, dans un contexte actuel où la grande hydraulique (grands barrages), associée aux vastes périmètres irrigués, est encore en pleine expansion. La multiplication de ces petits réservoirs artificiels trouve pourtant ses origines dans des événements historiques très différents au Brésil et en Inde.

Dans le Nordeste semi-aride, l'avènement des *açudes* est étroitement lié à l'histoire de la colonisation de la région par les Portugais, qui avaient d'ailleurs connu les *tanks* indiens du fait de leur présence ancienne en Inde (le mot '*tank*' vient du portugais '*tanque*', signifiant 'étang'), et au problème de l'alimentation en eau qui allait rapidement s'imposer aux colons et à leurs troupeaux (Molle, 1991). Face à l'extrême irrégularité des précipitations qui règne dans le *Sertão*, la sédentarisation des premiers propriétaires dans l'intérieur semi-aride au début du XVIII<sup>e</sup> siècle a entraîné la nécessité de disposer d'eau et de la stocker. Dès lors, les habitants du *Sertão* ont, chaque fois qu'ils l'ont pu, construit des *açudes*. Afin de pallier les difficultés croissantes d'approvisionnement en eau liées à l'accroissement démographique, et pour faire face aux sécheresses récurrentes qui sévissent dans le *Sertão*, plusieurs séries de grands travaux orientés vers la construction d'*açudes* ont été entreprises par les pouvoirs publics depuis l'époque impériale. C'est ainsi que Molle (1991) a pu montrer la correspondance entre les périodes de sécheresses de fréquence ENSO et les investissements du gouvernement fédéral pour la construction des grands *açudes*.



**Figure 3 :**

Concentration géographique des petits réservoirs dans les régions semi-arides du nord-est du Brésil et du sud de l'Inde. A : bassin du Rio Saco et son réseau d'açudes dans l'État du Rio Grande do Norte, NE Brésil (d'après Molle, 1991, redessiné).

B : région aménagée selon le système des tanks dans l'État du Karnataka, Inde du Sud (d'après Bourgeon, 1987, redessiné). Voir localisations sur la figure 1.

En Inde semi-aride, la construction de retenues remonte à une période beaucoup plus ancienne, puisque quelques *tanks* ont été utilisés dès l'Antiquité au Karnataka et en pays tamoul pour l'irrigation. Cette transformation du paysage de la zone sèche indienne correspond à une propagation du succès économique et culturel de la riziculture irriguée. Toutefois, comme pour le Nordeste brésilien, Gunnell *et al.* (2007) ont pu montrer que les grandes phases de construction des *tanks* depuis 2000 ans ont globalement coïncidé avec des périodes de fluctuation des moussons indiennes du Nord-Est et du Sud-Ouest, ce qui souligne bien des stratégies identiques d'adaptation humaine à une variabilité climatique spécifique aux zones semi-arides.

Seules les priorités définies dans l'utilisation de ces ressources hydriques diffèrent entre les deux régions mises en comparaison (Fig. 4) : alimentation en eau des hommes et du bétail durant la saison sèche au Brésil, irrigation gravitaire des cultures en Inde, irrigation destinée à pallier l'insuffisance et l'irrégularité des précipitations pendant et après la saison des pluies (Sehgal *et al.*, 1990 pour une estimation du déficit hydrique et de la durée de la période de culture sans irrigation) et parfois à permettre la culture du riz qui, sans cet appoint, serait impossible (Mukudan, 1997). Des préoccupations différentes au Brésil et en Inde ont finalement conduit à la multiplication des petits barrages que l'on estime aujourd'hui à plus 70 000 dans le Nordeste brésilien (Molle, 1991) et à plus de 127 000 en Inde du Sud si l'on prend en compte les trois États du Tamil Nadu, de l'Andhra Pradesh et du Karnataka réunis (Anonyme, 1997). Avec des densités proches d'un *açude* par kilomètre carré dans certaines régions, ceci fait aussi du Nordeste brésilien semi-aride la deuxième région au monde par

la densité de ses réservoirs artificiels, après l'Inde du Sud (Lazarro, 2000).

Par leur nombre et leur densité, les *açudes* et les *tanks* constituent la base des systèmes locaux de gestion de l'eau dans le Nordeste brésilien et le sud de l'Inde. Fermés par des digues en terre

valorisant l'eau des puits a toujours été secondaire au Brésil (Sabourin *et al.*, 2002), ce qui n'est pas le cas en Inde où l'irrigation à partir des puits vient compléter l'irrigation par *tank* par des appoints d'eau non négligeables.

### L'idée d'un transfert technologique

L'idée de développer l'irrigation à partir des *açudes* brésiliens n'est pas nouvelle (Laraque, 1991 ; Molle, 1991). Étant donné la similitude quasi-parfaite des conditions physiques et des aménagements hydrauliques entre les deux régions semi-arides indienne et brésilienne, et compte tenu du succès de l'agriculture irriguée indienne et de la sécurité alimentaire qu'elle procure, l'idée d'un transfert technologique du système d'irrigation des *tanks* vers les *açudes* du Nordeste brésilien nous a semblé être une piste féconde de réflexion. Elle paraît d'autant plus pertinente dans un contexte mondial où le spectre de pénuries alimentaires revient au premier plan de l'actualité (Swaminathan, 2007 ; Brown et Funk, 2008). Avec le formidable potentiel que représentent les 70 000 *açudes* du Nordeste brésilien, le passage à l'irrigation pourrait être considéré comme un pas décisif dans le processus de développement économique de cette région en retard sur le sud du Brésil. Ainsi que l'a souligné Cavaille (1989), « même si la région n'a ni passé, ni expérience dans ce domaine, ce n'est pas artificialiser le milieu que de profiter des ressources disponibles ».

Par ailleurs, on observe depuis quelques années des changements d'attitude des pouvoirs publics vis-à-vis des politiques de développement de la région Nordeste : à la différence des projets traditionnels qui se sont succédé au cours du XX<sup>e</sup> siècle, l'intervention des gouvernements n'est plus destinée à une élite d'agriculteurs, car elle vise aussi, semble-t-il, à diffuser l'irrigation dans les petites propriétés (Durousset et Cohen, 2000).

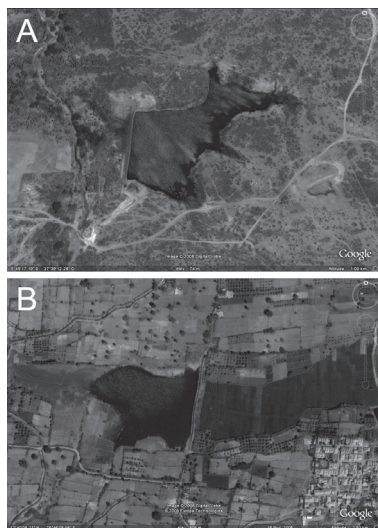


Figure 4 : Vues aériennes (images Google Earth) de l'organisation typique des terroirs autour d'un *açude* brésilien (A) et d'un *tank* indien (B). Alors que l'*açude* est essentiellement dévolu à l'alimentation en eau domestique des populations riveraines et à l'abreuvement du bétail dispersé dans la « caatinga » où les cultures sont rares, l'irrigation gravitaire des cultures est une pratique traditionnelle à l'aval du *tank*, dans un finage par ailleurs dominé par l'agriculture pluviale sur sols rouges (Luvisols chromiques).

construites en travers des bas-fonds, ils forment fréquemment des chapelets dans l'axe des talwegs (Fig. 3) et sont souvent associés à une série de puits creusés dans le matelas colluvio-alluvial peu épais et le socle sous-jacent en aval des retenues. Comme pour les *açudes*, la mise en place de cultures

terres irriguées avec l'eau des *tanks* ne couvrent qu'au mieux environ 15 % des terroirs les plus complètement aménagés selon cette technique. L'essentiel de la production agricole de la zone

## Perspectives de transfert du système d'irrigation des "tanks" vers les "açudes" : réussite assurée ou risque inutile ?

Avant d'examiner plus en détail les perspectives de développement de l'irrigation au Brésil à partir des *açudes* sur le modèle des *tanks* indiens, il convient de rappeler qu'en Inde et sur socle, les

semi-aride indienne est donc issue d'autres systèmes, soit irrigués (canaux avec prises d'eau sur des rivières à écoulement pérenne), soit pluviaux (Fig. 4B). La faible place prise par l'agriculture pluviale dans le Nordeste brésilien (Fig. 4A) constitue un premier indice fort d'absence d'une tradition agraire importante dans ce pays, alors qu'en Inde il s'agit d'une tradition ancienne dont on trouve des témoignages dans des textes anciens (par exemple : Parashara au IV<sup>e</sup> siècle av. J.C., cité par Sadhale, 2006 ; puis dans les récits des voyageurs européens du XVIII<sup>e</sup> siècle : voir à ce sujet les extraits rassemblés dans le chapitre « L'art raffiné des paysans » de l'ouvrage de Deleury, 1991). Certes, le développement de l'agriculture du Nordeste peut et doit aussi passer par le développement des cultures pluviales et des pratiques associées, mais nous limiterons ici nos propos à l'agriculture irriguée.

### Examen approfondi des conditions morphopédologiques locales

Malgré les similitudes globales présentées plus haut, les conditions morphopédologiques sont en réalité légèrement moins favorables au Brésil qu'en Inde.

a - L'apparente similitude est en partie une conséquence de la façon dont ont été représentés cartographiquement les sols au Brésil. Il nous a semblé, et nous avons pu le vérifier à maintes reprises autour du massif de Baturité (Bétard, 2007), que les auteurs des cartes pédologiques brésiliennes avaient tendance à ne représenter que le type le plus évolué des sols présents dans un secteur donné. Il s'agit d'un choix qui peut se justifier quand on cherche à montrer les types de pédogenèse à petite échelle, mais qui conduit néanmoins à des cartes peu adaptées à l'évaluation des aptitudes agricoles. Ainsi les Luvisols chromiques sont surreprésentés par rapport à leur importance réelle sur le terrain. Cette surreprésentation par des aplats de couleur homogène conforte faussement l'idée de grande ressemblance avec l'Inde, où ces sols sont effectivement très présents sur les glacis au pied des reliefs résiduels. Au Brésil, ils occupent plutôt des lambeaux éparés sur des glacis plus disséqués.

b - La seconde différence concerne les autres sols présents dans le paysage. La dissection,

déjà responsable de la moindre importance des Luvisols sur les glacis au Brésil, affecte plus encore les parties basses du paysage où elle génère une mosaïque de Cambisols peu profonds (leptiques selon la terminologie de la WRB) et d'affleurements rocheux. En Inde, les bas de pente ont tendance à être ennoyés par des formations colluvio-alluviales qui, selon leur ancienneté, portent des Cambisols (colluviques ou eutriques) pour les plus récentes, ou ont vu se développer des Vertisols pour les plus anciennes.

c - La troisième différence tient au régime géochimique des sols : alors que le calcium a tendance à s'accumuler sous forme de carbonates dans les paysages indiens où il est exploité pour la production de chaux, il n'est pas signalé au Brésil où nous n'avons pas pu observer de profils carbonatés. Au Brésil en revanche, des problèmes de salinisation, voire d'alcalisation, liés à la présence de sodium sont signalés (Projeto Radambrasil, 1981 ; Jacomine, 1996) dans les Planosols qui occupent certaines parties planes et périodiquement inondées des paysages.

Ces différences, dont l'identification a été rendue possible par des observations de terrain puisque les documents généraux les occultent, ont des implications en termes de contraintes physiques pour le développement agricole. On peut tout d'abord indiquer que, sur le plan de la fertilité chimique des sols, il n'y a pas de différence importante entre les couvertures pédologiques de l'Inde et du Brésil décrites ci-dessus ; les Luvisols chromiques aussi bien que les sols plus minces comme les Cambisols ont tous des réserves minérales importantes et des argiles de haute activité. Ce n'est donc pas autour de cet aspect qu'il faut chercher des contraintes physiques particulières pouvant expliquer le faible développement de l'agriculture brésilienne dans la zone semi-aride du Nordeste. Nous rejoignons sur ce point l'opinion de Leprun (1993), qui considère que les sols de ces terroirs brésiliens ont des propriétés plus favorables que les sols des régions sahéennes ; nous avons en revanche plus de mal à établir une hiérarchie entre les sols indiens et les sols brésiliens pour les deux zones semi-arides mises en comparaison.

Si l'on envisage le développement de l'irrigation gravitaire en contrebas des *açudes*, il faut disposer de surfaces planes ou les créer. Au Brésil, le modelé



des bas de versants résultant d'une incision des talwegs (10-20 m) est relativement irrégulier et l'alternance de sols minces et d'affleurements n'est guère favorable aux travaux de planage. Plus bas, mais pas de façon systématique, on trouve des Planosols qui présentent une topographie plane mais des problèmes de salinisation / sodisation. Les possibilités de développement de ce type d'irrigation nous paraissent de ce fait limitées. Il existe aussi en Inde des terroirs où l'on retrouve une incision des talwegs du même type et des sols plus minces qu'ailleurs. Ceux-ci sont alors cultivés en pluvial quand les horizons rouges n'ont pas été entièrement décapés, ou sont laissés à l'abandon par les paysans quand les arènes affleurent, et éventuellement traités par les services gouvernementaux qui y conduisent des programmes de reboisement couplés ou non à des techniques de défense et restauration des sols (DRS).

Si l'on envisage de développer un autre type d'irrigation sur des terres situées latéralement par rapport aux *açudes*, et donc sur des topographies plus planes où les affleurements rocheux sont aussi plus rares, il faut alors envisager un moyen d'exhaure.

Au-delà des problèmes de salinisation des sols déjà évoqués, des risques de salinisation de l'eau des *açudes* sont souvent soulignés au Brésil et sont en partie liés aux conditions morphopédologiques locales. Utilisés traditionnellement, les *açudes* connaissent une forte évaporation (de l'ordre de 3000 mm.an<sup>-1</sup> : Molle 1991, Leprun *et al.*, 1995) conduisant à l'augmentation progressive de la salinité de l'eau résiduelle (Laraque, 1991). Ceci apparaît comme une contrainte supplémentaire à une utilisation pour l'irrigation, mais ce n'est peut être qu'une contrainte apparente et locale : (i) apparente car une irrigation bien conçue utiliserait l'eau à la fin de la saison des pluies, et non pas au creux de la saison sèche, donc à une période où la salinité de l'eau de l'*açude* n'est pas très différente de celle de l'eau de ruissellement et dépend finalement du type de sol dominant dans le bassin versant d'alimentation ; (ii) locale, justement en raison de ce dernier élément, car s'il existe bien des sols libérant des sels dans l'eau qui ruisselle sur les versants nordestins (notamment les solonetz et les planosols d'après Leprun 1988 cité par Molle

1991), ceux-ci ne sont pas généralisés et sont plutôt en position basse et susceptibles d'être irrigués, qu'en position haute au-dessus des retenues. Les eaux qui ruissellent sur les Luvisols chromiques et les Cambisols ont quant à elles une faible salinité. Nous percevons finalement assez mal pourquoi le problème de la salinité de l'eau des *açudes* serait une contrainte importante au Brésil alors que la salinité de l'eau des *tanks* n'est pratiquement jamais évoquée en Inde ; il s'agit plus vraisemblablement de la conséquence de modes de gestion de l'eau différents.

### Conditions historiques et limites socio-culturelles d'un transfert technologique

Outre les contraintes physiques, les conditions historiques et socio-culturelles, très différentes en Inde et au Brésil, doivent être analysées dans la perspective du développement d'une agriculture irriguée au Brésil.

En Inde, les traditions hydrauliques remontent à plusieurs milliers d'années, comme en témoignent les épopées traditionnelles ainsi que des textes védiques, bouddhistes ou jains (Pande, 1997), même si la prolifération des *tanks* semble plus récente. Dans son étude des systèmes d'irrigation traditionnels au Karnataka, Barah (1996) fait remonter la construction des premiers *tanks* aux V<sup>e</sup> et VI<sup>e</sup> siècles et indique qu'ils ont connu leur apogée entre les X<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles, puis sous l'empire Vijayanagar (1336-1565). Ils sont construits par des monarques locaux ou des temples (en Inde l'eau a un caractère à la fois sacré et purificateur). Ils ont ensuite perdu de leur importance, semble-t-il tout d'abord à cause des conflits qui ont marqué la période précédant le contrôle de l'Inde par l'administration britannique (fin du XVIII<sup>e</sup>), puis ensuite par la faute du système des taxes imposé par cette même administration. Ce déclin s'évalue surtout par la perte de leur capacité de stockage de l'eau suite au comblement du *tank* par les sédiments. Cette sédimentation est normalement contrôlée par des travaux de curage, la boue étant utilisée comme amendement ou pour la fabrication de briques et poteries. Elle peut s'accélérer quand le bassin versant connaît des phases d'érosion suite, par exemple, à la distribution de terres 'forestières' à des paysans sans terre qui y font des cultures

pluviales (Chikkanna, 1997). Un *tank* plus ou moins comblé ne servira plus que comme surface d'infiltration et contribuera au rechargement des nappes, s'il n'est pas aussi en partie cultivé. Dans le même temps, des puits de forage profonds sont creusés et assurent l'irrigation phréatique des cultures, parachevant le déclin du système d'irrigation par stockage des eaux de ruissellement. On peut aussi relier développement et déclin des *tanks* à la densité de population comme le fait Von Oppen (1987) : pour cet auteur le développement des *tanks* nécessiterait une densité minimale de 50-60 hab km<sup>-2</sup>, leur déclin s'amorcerait quand celle-ci dépasse 220 hab km<sup>-2</sup>. Pour justifier la densité minimale, on peut rappeler que le chantier de construction du barrage, événement unique dans la vie d'un *tank*, peut mobiliser un nombre très important d'ouvriers. Adiceam (1966), citant un texte ancien, indique que 1000 hommes et 100 charrettes furent nécessaires pendant deux ans pour construire le *tank* de Porumamilla. Le système des *tanks*, et les augmentations de production agricole qu'il génère, permet un accroissement corrélatif de la population. Victime de son propre succès, il porterait ainsi en lui les germes de son déclin. Notons qu'il n'y a pas de contradiction entre cette relation avec la densité de population et les causes historiques suggérées par Barah (1996).

Le *tank* implique une organisation sociale forte pour deux aspects essentiels à son bon fonctionnement (Somasekhar Reddy, 1996) : d'une part l'entretien des infrastructures (réservoir, digue, canaux, vannes...) et d'autre part la distribution équitable et efficace de l'eau. La zone irrigable, ou *ayacut*, est ainsi gérée en plusieurs compartiments selon les possibilités d'irrigation une année donnée, chacun des compartiments est alimenté par des vannes situées en des endroits différents de la digue du *tank*. Les décisions concernant le choix des cultures et l'attribution des terres sont prises collégialement. Cette organisation sociale est locale, villageoise, en aucun cas elle n'implique une administration centrale puissante comme les systèmes d'irrigation basés sur l'aménagement des grands fleuves.

Dans le Nordeste brésilien, l'irrigation n'est pas une activité traditionnelle. Molle (1991) signale cependant quelques cas isolés et particuliers de culture irriguée dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans la

Chapada Diamantina et dans les contreforts de la Chapada do Araripe, qui jouissent de la présence de petites sources pérennes. Au Brésil, l'idée a surtout commencé à prendre corps à la suite des grandes sécheresses qui ont marqué la fin du XIX<sup>e</sup> et le début du XX<sup>e</sup> siècle (exemple de l'*açude* Cedro, à Quixadá, avec les vestiges encore visibles du canal d'irrigation datant de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle), tandis qu'à cette même époque, les spectaculaires succès technologiques – plus qu'environnementaux – obtenus par les Anglais en Inde et en Égypte faisaient écho dans le monde entier, y compris au Brésil. Pourtant, alors que l'irrigation se développait un peu partout, le Nordeste allait accumuler un retard historique vis-à-vis de la pratique de l'irrigation qui trouve probablement ses origines dans la trame latifundiaire régionale héritée du colonialisme. La maîtrise de l'eau par l'irrigation, comme le montre la civilisation indienne, ne peut probablement se faire sans une organisation sociale suffisamment forte qui puisse permettre l'usage et la distribution rationnelle de cette eau. Molle (1991) soulignait que la structure individualiste de la société *sertaneja* était à l'opposé de la «civilisation du canal», elle est vraisemblablement tout aussi à l'opposé de la «civilisation du *tank*».

À l'absence de tradition hydraulique s'ajoute l'absence d'une tradition agricole bien ancrée. Depuis la colonisation, la région est tournée vers l'élevage extensif même si des mutations importantes sont aujourd'hui perceptibles (Caron, 2006). L'absence de tradition hydro-agricole a d'ailleurs souvent conduit à l'abandon total ou partiel des périmètres irrigués récemment créés autour des grands barrages, au plus grand désarroi des pouvoirs publics, les paysans préférant revenir à leur système agro-pastoral traditionnel centré autour du petit élevage extensif. Initialement construit pour l'alimentation en eau des hommes et des troupeaux, l'*açude* ne résulte pas d'une saturation de l'espace par la population et n'est en aucun cas une réalisation connotée de significations religieuses. Les *açudes* ont néanmoins acquis une importance et une dimension psychologique qui engendrent souvent des réticences à l'idée d'une utilisation plus intensive (Molle, 1991). Enfin, l'agriculture a toujours été perçue dans le Nordeste brésilien comme une activité dépourvue de noblesse, que l'on confiait volontiers à l'indien ou au métis. Ceci à l'opposé des mentalités indiennes,

où l'agriculture a toujours été socialement bien considérée.

Cette interrogation sur l'absence de tradition agraire nous amène à une interrogation plus pratique : est-il possible de gérer une réserve d'eau collinaire en zone semi-aride brésilienne qui servira à l'irrigation – ce qui implique une utilisation assez précoce de l'eau quand elle est abondante, peu salée et vient compléter les pluies – mais qui constituera en outre une réserve pour l'alimentation du bétail pendant la saison sèche, voire en cas de succession d'années sèches ? Cela semble pratiquement impossible car l'utilisation d'une grande partie des réserves d'eau pour l'irrigation combinée à la forte évaporation qui sévit pendant la période sèche conduira à l'assèchement des *açudes*. On met ainsi en évidence une source potentielle de conflit d'intérêts entre les deux usages, à moins d'affecter les réservoirs à des fonctions spécifiques suivant un zonage déterminé.

On doit aussi ajouter que des densités de population trop faibles ne sont *a priori* pas favorables au développement généralisé d'une agriculture irriguée qui nécessite énormément de main d'œuvre. Les concentrations démographiques comprises entre 15 et 30 hab · km<sup>-2</sup> dans le Nordeste semi-aride (Ipece, 2006) sont probablement insuffisantes pour justifier ou susciter ce mode de production.

C'est dans la rigidité de la structure foncière et les inégalités de la structure sociale du Nordeste brésilien qu'il faut cependant rechercher les explications les plus convaincantes aux difficultés d'introduire l'irrigation à partir de l'eau des *açudes* de toute taille. L'idée d'un transfert technologique et la promesse d'une révolution verte *via* le développement d'une agriculture irriguée ne doivent pas occulter le problème majeur que demeure l'accès à l'eau et, au-delà, l'accès à la terre dans le Nordeste. Première région du Brésil colonisée par les Portugais, le Nordeste a très tôt connu la concentration des richesses dans les mains d'une minorité, et cette tradition de fort pouvoir local perdure encore aujourd'hui à travers des rapports sociaux archaïques et inégalitaires. La concentration foncière dans les mains de quelques grands propriétaires a créé une situation de dépendance des petits agriculteurs qui, de ce fait, se

voient souvent réserver un accès plus que restreint à l'eau des *açudes* et aux terres potentiellement irrigables qui les entourent.

Pour conclure cette analyse, nous pouvons dire que le *tank* indien est autant un modèle d'organisation sociale qu'une technique, et qu'il est très difficile de dissocier les deux. Quand les conditions sociales changent, et cela a été le cas en Inde avec la colonisation et l'émergence d'un pouvoir central, le déclin du système s'amorce. Des éléments techniques du développement de l'irrigation au Brésil à partir des *açudes* peuvent certainement être discutés à la lumière de ce qui se passe avec les *tanks* indiens, mais un transfert complet paraît peu réaliste sans envisager des bouleversements socio-culturels profonds.

### Vers une valorisation élargie de l'eau des *açudes*

Une mise en valeur plus intensive de l'eau des *açudes* est possible sans qu'il soit pour autant nécessaire de faire appel à des logiques de transfert technologique, en particulier des techniques de l'irrigation, contraignantes en matière d'infrastructure (coût des installations et des éventuels travaux de planage, entretien...) et difficiles à intégrer auprès d'une population pour qui l'agriculture irriguée n'est pas une activité traditionnelle. Bien que prioritairement centrée sur l'alimentation en eau, la valorisation de l'eau des *açudes* peut être élargie en intégrant trois types d'utilisation productive autour des retenues.

a – La petite irrigation de complément : elle est à l'échelle des disponibilités en eau, en terre et en main d'œuvre de la petite propriété (Molle *et al.*, 1988). À partir de systèmes de distribution simples (siphons), une irrigation gravitaire de faible coût est possible dans les terres de bas-fond situées sous le niveau du plan d'eau en aval de l'*açude* et peut être aisément complétée par l'eau des puits, ce qui permet d'assurer la sauvegarde des cultures annuelles et la production de fourrages, légumes et fruits durant une partie de la saison sèche. Traditionnellement, les terres situées à l'aval des réservoirs sont parfois plantées d'arbres fruitiers (manguiers, bananiers, cocotiers) ou de fourrages qui bénéficient de l'humidité naturelle des alluvions et surtout de l'infiltration de l'eau de l'*açude*. Le

même type de mise en valeur peut être fait par l'utilisation d'une technique d'irrigation simple et localisée qui permet de se soustraire avec plus de sécurité aux aléas climatiques.

b – La pisciculture semi-intensive : l'usage piscicole des réservoirs est un axe de mise en valeur qui a été envisagé depuis longtemps dans le Nordeste (depuis les années 1930), en partie pour faire taire les critiques selon lesquelles les *açudes* construits ne servaient à rien (Molle, 1991). Après quelques années de déclin dans la dernière décennie du XX<sup>e</sup> siècle, la pisciculture apparaît aujourd'hui comme un secteur productif émergeant dans le Nordeste semi-aride (Lazarro, 2000). Les études montrent que la plupart des réservoirs sont des écosystèmes à forte productivité en phytoplancton et zooplancton, favorable à la production piscicole. Traditionnellement centrée sur les grands *açudes*, une pisciculture semi-intensive associant alevinage, contrôle des espèces indésirables et alimentation des poissons à base de matière organique (résidus agricoles, fumures) semble parfaitement adaptée aux petits *açudes*, tout en maintenant la pratique de la pêche artisanale. La mise en valeur piscicole des réservoirs constitue une alternative économique rentable pour les petits propriétaires qui la pratiquent et une source locale de protéines à bas coût pour les populations du Sertão brésilien.

c – Les cultures de décrue : appelées localement « cultures de *vazante* », elles constituent la forme la moins onéreuse de valorisation agricole des *açudes*, et représentent déjà une activité traditionnelle marquante dans certaines régions du Nordeste semi-aride (ex. région du Sériado, dans l'État du Rio Grande do Norte). C'est la culture que les paysans font sur les parties en faible pente des marges inondées des *açudes*, au fur et à mesure que s'abaisse le niveau du lac pendant la saison sèche (Dantas Antonino et Aubry, 2002 ; Dantas Antonino *et al.*, 2005). Profitant de l'humidité profonde dans le sol, mais aussi des limons fertiles

qui se déposent lors du retrait des eaux, les cultures de décrue associent généralement des fourrages et des plantes à cycle court (patate douce, melon, pastèque) dont la croissance racinaire est suffisante pour accompagner la baisse du niveau de la nappe dans le sol. La culture de *vazante* permet ainsi une production de légumes de contre-saison extrêmement valorisante. À leurs côtés, les fourrages de *vazante* constituent de véritables « silos verts » pendant la saison sèche, avec des rendements de 30 à 100 t ha<sup>-1</sup> après 40 à 60 jours seulement (Molle, 1991). La pratique de tels systèmes de décrue, qui ne nécessitent ni investissement, ni consommation d'énergie, est en soi très ancienne et s'observe sur d'autres continents (Barrow, 1999).

Les trois types de valorisation de l'eau des *açudes* évoqués ci-dessus sont déjà pratiqués de manière disparate dans quelques régions du Nordeste semi-aride et ont partout montré leur succès. Ces systèmes de production sont certainement généralisables autour des petits *açudes* multi-usages et auprès des agriculteurs familiaux du Sertão avec des possibilités extensibles d'adaptations locales. Aujourd'hui, la construction d'un grand *açude* pour la seule alimentation en eau serait anti-économique, quand on connaît les potentialités agricoles des systèmes morphopédologiques du Nordeste semi-aride et de ses multiples réservoirs.

Plus originale peut être, et plus audacieuse sûrement, est l'idée de se référer encore une fois au modèle indien, mais pour passer directement à la phase qui suit le déclin des *tanks*, quand ceux-ci se comblent et que les puits individuels se développent. Il faudrait alors favoriser l'infiltration des eaux de ruissellement pour la recharge des nappes. L'*açude* peut bien sûr y contribuer, mais il faudrait multiplier les digues d'infiltration, puis favoriser la création de puits, système individuel peut-être mieux adapté à la société nordestine que celui du *tank* indien – certains puits pouvant être réservés à l'alimentation des hommes et des troupeaux.

## Conclusion

Au terme de cette analyse, deux points nous semblent devoir être soulignés. Le premier tient à la confiance que l'on peut, ou doit, attribuer aux documents cartographiques disponibles pour

mener des études comparatives. Nous avons ainsi montré les insuffisances de la carte pédologique brésilienne : ces limites ne sont pas dues à une quelconque incompétence de ses auteurs, mais à un

enchaînement de faits (rédaction initiale utilisant un système taxonomique local, conversion de la légende dans un système international n'utilisant pas les mêmes critères de classification, puis réédition de la carte sans revoir ses insuffisances) qui n'est pas facilement appréhendable. Cette remise en cause doit être comprise comme une incitation à la prudence et constitue une mise en garde face aux conclusions hâtives qui ressortent d'études de géographie comparative fondées sur des critères physiques, notamment pédologiques, insuffisamment étudiés (Gunnell, 1997). Le second point est lié à l'importance de la prise en considération des conditions socio-économiques dans les transferts technologiques : on y pense quand il s'agit de transférer une technique de pays

dits 'développés' vers des pays dits 'en voie de développement', mais c'est tout aussi fondamental entre deux pays 'émergents'.

Finalement, devant les difficultés persistantes à transposer l'agriculture irriguée autour des *açudes* brésiliens, l'agriculture pluviale reste adaptée à beaucoup d'espaces impropres à l'irrigation (Cavaille, 1989). Des cultures résistantes à la sécheresse, comme le cactus inerme fourrager, utilisé comme aliment de disette pour le bétail (Le Houérou, 2006), constituent aussi des alternatives au développement agricole durable dans une région semi-aride de tradition d'élevage. Enfin le creusement de puits, associé à des dispositifs visant à favoriser l'infiltration des eaux de pluies tels que les *açudes* eux-mêmes, nous semble être une solution à explorer.

## Bibliographie

- ADICEAM E. 1966 – *La géographie de l'irrigation dans le Tamilnad*. EFEO (hors série), Paris, 522 p.
- Anonyme, 1997 – From community control to state supremacy. The rise and fall of water harvesting. In : A. Agarwal & S. Narain (eds.) : *Dying wisdom: rise, fall and potential of India's traditional water harvesting systems*, State of India's environment n°4, a citizens' report, Centre for Science and Environment, New Delhi, pp. 269-311.
- BARAH B.C., 1996 – Traditionnal water harvesting systems in India. In : B.C. Barah (ed.) : *Traditional water harvesting systems: an ecological economic appraisal*, New Age International Publishers, New Delhi, pp. 3-68.
- BARROW C.J., 1999 – *Alternative irrigation: the promise of runoff agriculture*. Earthscan, Londres, 172 p.
- BÉTARD F., 2007 – *Montagnes humides au cœur du Nordeste brésilien semi-aride : le cas du massif de Baturité (Ceará). Apports d'une approche morphopédologique pour la connaissance et la gestion des milieux*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sorbonne, 442 p.
- BOURGEON G., 1987 – Les "sols rouges" des régions semi-arides du Sud de l'Inde. II – Potentialités, rôle dans les systèmes agraires. *L'Agronomie Tropicale*, 42(3), pp. 165-170.
- BOURGEON G., 1992 – *Les "sols rouges" de l'Inde péninsulaire méridionale : pédogenèse fersiallitique sur socle cristallin en milieu tropical*. Publ. du département d'écologie, Inst. Fr. de Pondichéry, n°31, 271 p.
- BROWN M.E., FUNK C.C., 2008 – Food security under climate change. *Science*, 319, pp. 580-581.
- CARON P., 2006 – Elevage et semi-aride brésilien : immobilisme proclamé et mutations intenses. *Sécheresse*, 17(1-2), pp. 288-294.
- CAVAILLE B., 1989 – La cohabitation de l'homme avec la sécheresse dans le Nordeste brésilien. In : B. Bret (coord.) : *L'homme face aux sécheresses. Nordeste brésilien, Sabel africain*. Ed. EST-IHEAL/Samuel Tastet, Paris, pp. 303-307.
- CHIKKANNA R., 1997 – Glimmers of hope. In : A. Agarwal & S. Narain (eds.) : *Dying wisdom: rise, fall and potential of India's traditional water harvesting systems*, State of India's environment n°4, a citizens' report, Centre for Science and Environment, New Delhi, pp. 321-323.
- DANTAS ANTONINO C.D., AUDRY P., 2002 – Le fonctionnement hydro-salin du système de vazante en zone semi-aride dans le Nordeste brésilien. *Sécheresse*, 13(4), pp. 266-273.
- DANTAS ANTONINO C.D., HAMMECKER C., MONTENEGRO S.M.L.G., NETTO A.M., ANGULO-JARAMILLO R., LIRA C.A.B.O., 2005 – Subirrigation of land bordering small reservoirs in the semi-arid region in the Northeast of Brazil: management and water balance. *Agric. Wat. Manag.*, 72, pp. 131-147.
- DELEURY G., 1991 – *Les Indes florissantes*. Coll. Bouquins, Robert Laffont. 1064 p.
- DUROUSSET E., COHEN M., 2000 – Exclusion sociale et gestion des ressources hydriques : le double défi des nouvelles politiques de développement dans la zone semi-aride du Brésil. *Nature-Sciences-Sociétés*, VIII(2), pp. 17-30.
- FAO, 1974 – *Carte mondiale des sols au 1 : 5 000 000<sup>e</sup>*. Unesco, Paris.
- FAO, 2006 – *World Reference Base for Soil Resources. A framework for international classification, correlation and communication*. World Soil Resources Report, 103, 128 p.

- GOUROU P., 1991 – *L'Afrique tropicale, nain ou géant agricole ?* Flammarion, Paris, 229 p.
- GUNNELL Y., 1997 – Comparative regional geography in India and West Africa. Soils, landforms and economic theory in agricultural development strategies. *The Geographical Journal*, 163(1), pp. 38-46.
- GUNNELL Y., ANUPAMA K., SULTAN B., 2007 – Response of the South Indian runoff-harvesting civilization to northeast monsoon rainfall variability during the last 2000 years: instrumental records and indirect evidence. *The Holocene*, 17(2), pp. 207-215.
- HASTENRATH S., 2006 – Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. *Progress in Oceanography*, vol. 70, 2-4, pp. 407-415.
- IPECE, 2006 – *Anuário estatístico do Estado do Ceará*. (accessible sur [www.ipece.ce.gov.br](http://www.ipece.ce.gov.br)).
- JACOMINE P.K.T., 1996 – Solos sob caatinga: características e uso agrícola. In : V.H. Alvarez, L.E.F. Fontes, M.P.F. Fontes (eds) : *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. SBCE/UFV, Viçosa, pp. 95-111.
- LARAQUE A., 1991 – *Comportements hydrochimiques des « açudes » du Nordeste brésilien semi-aride. Évolutions et prévisions pour un usage en irrigation*. Thèse doct., Montpellier, 394 p.
- LAZARRO X., 2000 – Vers une meilleure gestion des açudes du Nordeste brésilien. *Fiche scientifique IRD*, n°111 (accessible sur [www.ird.fr/fr/actualites/fiches/2000/fiche111.htm](http://www.ird.fr/fr/actualites/fiches/2000/fiche111.htm)).
- LE HOUÉROU H.N., 2006 – Le milieu naturel, la végétation, les parcours, le bétail et la stratégie antisécheresse dans le Nordeste brésilien. *Sécheresse*, 17(1-2), pp. 275-287.
- LEPRUN J-C., 1985 – La conservation et la gestion des sols dans le Nordeste brésilien. Particularités, bilans et perspectives. *Cab. ORSTOM, sér. pédol.*, vol. XXI(4), pp. 257-284.
- LEPRUN J-C., 1993 – Sertão brésilien et Sahel africain : écologie comparée de deux régions sèches et conséquences sur l'environnement. In : H. Paquet & N. Clauer (eds) : *Sédimentologie et géochimie de la surface*. Colloque à la mémoire de Georges Millot, Acad. Sci. Paris, pp. 127-140.
- LEPRUN J-C., MOLINIER M., CADIER E., FOTIUS G., GALÍNDO O., RAMOS DE SOUZA H., 1995 – Les sécheresses de la région Nordeste du Brésil et leurs conséquences. *Sécheresse*, 6(1), pp. 23-33.
- MOLLE F., 1991 – *Caractéristiques et potentialités des « açudes » du Nordeste brésilien*. Thèse Sci., Univ. Montpellier II, 380 p.
- MOLLE F., COURCIER R., CADIER E., 1988 – Quelques aspects de la petite irrigation dans le Nordeste brésilien. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, n°19, pp. 89-98.
- MORGAN W.T.W., 1988 – Tamilnad and Eastern Tanzania: comparative regional geography and the historical development process. *The Geographical Journal*, 154(1), pp. 69-86.
- MUKUDAN T.M., 1997 – The ery systems of South India. In : B.C. Barah (ed.) : *Traditional water harvesting systems: an ecological economic appraisal*, New Age International Publishers, New Delhi, pp 71-100.
- PANDE B.M., 1997 – Traditional water harvesting, a multi-millennial mission. In : A. Agarwal & S. Narain (eds) : *Dying wisdom: rise, fall and potential of India's traditional water harvesting systems*, State of India's environment n°4, a citizens' report, Centre for Science and Environment, New Delhi, pp. 11-23.
- PROJETO RADAMBRAZIL, 1981 – *Levantamento integrado dos recursos naturais do Brasil. Folha Jaguaribe-Natal*. Ministério das Minas e Energia-MME, Rio de Janeiro, 740 p.
- SABOURIN E., SIDERSKI P., MATOS L.C., TRIER R., 2002 – Gestion technique vs gestion sociale de l'eau dans les systèmes d'agriculture familiale du Sertão brésilien. *Sécheresse*, 13(4), pp. 274-283.
- SADHALE N., 2006 – Water harvesting and conservation in ancient agricultural texts. *Asian Agri-History*, 10, pp. 105-120.
- SEHGAI J.L., MANDAL D.K., MANDAL C., VADIVELU S., 1990 – *Agro-ecological regions of India*. NBSS publication n°24, NBSS, Nagpur, 130 p + 1carte.
- SIBCS, 2005 – *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2ª edição, EMBRAPA, Rio de Janeiro, 360 p.
- SINGH N., MULYE S.S., PANT G.B., 1992 – Some features of the arid area variations over India: 1871-1984. *Pure and Applied Geophysics*, 138, pp. 135-50.
- SINGH N., SONTAKKE N.A., 1999 – On the variability and prediction of rainfall in the post-monsoon season over India. *International Journal of Climatology*, 19, pp. 309-39.
- SOMASEKHAR REDDY S.T., 1996 – Water management in areas irrigated by tanks In : B.C. Barah (ed.) : *Traditional water harvesting systems: an ecological economic appraisal*. New Age International Publishers, New Delhi, pp. 223-235.
- SWAMINATHAN M.S., 2007 – Can science and technology feed the world in 2025? *Field Crops Research*, 104, pp. 3-9.
- VON OPPEN M., 1987 – Tank irrigation in Southern India: Adapting a traditional technology to modern socioeconomic conditions. In : *Alfisols in the semi-arid tropics :Proceedings of a consultants' workshop on the art and management alternatives for optimizing the productivity of SAT Alfisols and related soils*, 1-3 december 1983, ICRISAT Center, India, Patancheru, India, pp. 89-93.